



**Bruno Alexandre Abreu da Silva** **Caracterização de nanofluidos do ponto de vista termo-físico**





**Bruno Alexandre Abreu da Silva** **Caracterização de nanofluidos do ponto de vista termo-físico**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e da Doutora Maria Alexandra Lopes de Fonseca, Investigadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Apoio financeiro da Fundação para a  
Ciência e a Tecnologia (FCT), Portugal  
no âmbito do projecto PTDC/EME-  
MFE/66482/2006



Dedico este trabalho aos meus pais Vasco e Fátima como forma da minha gratidão...



## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins**

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Aveiro

Arguente

**Prof. Doutor João Manuel da Costa e Araújo Pereira Coutinho**

Professor Associado com Agregação, Departamento de Química - Universidade de Aveiro

Orientador

**Prof. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia**

Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Aveiro

Co-orientador

**Doutora Maria Alexandra Lopes de Fonseca**

Investigadora do Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Aveiro





## **agradecimentos**

A realização desta tese de mestrado marca uma importante etapa da minha vida académica e pessoal, pelo que gostaria de deixar os meus agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram de forma directa ou indirecta para a sua concretização.

Em primeiro lugar, quero manifestar os meus agradecimentos à Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, orientadora da presente tese, pelo seu apoio, orientação e grande capacidade motivadora. Quero também agradecer-lhe a oportunidade concedida para trabalhar no projecto PTDC/EME-MFE/66482/2006.

Quero igualmente agradecer à minha co-orientadora Doutora Maria Alexandra de Fonseca pelo seu apoio, orientação e pelos seus comentários construtivos.

O meu profundo e sentido de agradecimento à minha família pelo incentivo e apoio dado ao longo dos anos. Aos meus pais Vasco e Fátima agradeço toda a disponibilidade, sacrifícios e apoio imprescindível.



**palavras-chave**

Nanofluidos, nanotubos de carbono, propriedades termo-físicas, condutividade térmica, viscosidade, coeficiente de transferência de calor por convecção

**resumo**

A troca de energia sob a forma de calor é um processo que está relacionado com uma enorme variedade de indústrias, desde a electrónica à automóvel. Frequentemente, o sistema para promover a transferência de calor inclui um fluido, como água destilada, etileno-glicol ou mesmo óleo, sendo o fenómeno de transferência de calor por convecção o mais relevante. Contudo, são várias as limitações térmicas dos fluidos convencionais que impedem um melhor desempenho térmico dos dispositivos, comprometendo a eficiência energética dos sistemas bem como a miniaturização dos dispositivos. Com o intuito de desenvolver e estudar o desempenho de novos fluidos como meio de transferência de calor, foram adicionados nanotubos de carbono a fluidos convencionais (como água destilada). Estes novos fluidos são denominados nanofluidos. Para o estudo das transferências de calor, foi projectada e desenvolvida uma bancada de transferência de calor e foi dimensionado um aparato experimental capaz de aferir os fenómenos de transferência de calor por convecção. O nanofluido flui através de um tubo circular com uma temperatura de superfície média constante, em sujeito a diferentes condições de escoamento. A relação entre as diferentes variáveis como: propriedades termo-físicas, fracção volúmicas, temperatura e a velocidade de escoamento são, assim, objecto de estudo detalhado nesta dissertação.



**keywords**

Nanofluids, carbon nanotubes, thermo-physical properties, thermal conductivity, viscosity, convection coefficient of heat transfer

**abstract**

The exchange of energy in the form of heat is a process that is related to a variety of industries ranging from electronics to automotive. Often, to effectively promote heat transfer, conventional fluids such as water, EG or oil are selected. The latter leaving quite clear that the most relevant heat phenomenon is convection heat transfer. However, there are several thermal limitations to the conventional fluids that prevent a better thermal performance of devices, reducing the efficiency of heat exchanges. In order to develop and study the performance of new fluids as a means of transferring heat, carbon nanotubes were added to conventional fluids (such as distilled water). These new fluids are called nanofluids. For the study of heat transfer, it was designed and developed a heat transfer workbench and it has been designed an experimental apparatus able to measure the coefficient of heat transfer by convection. The nanofluid flows through a circular tube with a constant mean surface temperature, under different flow conditions. The relationship between different variables such as thermo-physical properties (viscosity, thermal conductivity, specific heat) CNT's, volume fraction, temperature and flow rate are therefore subjected to detailed study in this dissertation.



## Índice

Índice .....	1
Índice Figuras .....	3
Índice Tabelas .....	7
Nomenclatura .....	9
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 MOTIVAÇÃO.....	11
1.2 OBJECTIVOS .....	11
1.3 INTRODUÇÃO.....	11
<b>CAPÍTULO 2 - NANOFLUIDOS E SUAS APLICAÇÕES .....</b>	<b>13</b>
2.1 SISTEMAS DE NANOFLUIDOS .....	14
2.2 DESENVOLVIMENTO DE NANOFLUIDOS.....	15
2.3 ESTABILIDADE DOS NANOFLUIDOS .....	16
2.4 PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DOS NANOFLUIDOS.....	17
2.5 MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS NANOFLUIDOS .....	18
2.6 CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM SISTEMAS DE NANOFLUIDOS COM ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO (CNT's) .....	20
2.7 ESTUDOS ANALÍTICOS DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	22
2.8 VISCOSIDADE DOS NANOFLUIDOS.....	23
2.9 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO EM NANOFLUIDOS.....	24
<b>CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DO NANOFLUIDO .....</b>	<b>29</b>
3.1 MATERIAIS .....	29
3.2 TRATAMENTO QUÍMICO DOS CNT's .....	29
3.3 PREPARAÇÃO DOS NANOFLUIDOS .....	31
3.4 ESTUDO DA ESTABILIDADE DOS NANOFLUIDOS.....	31
3.5 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS NANOFLUIDOS.....	33
<b>CAPÍTULO 4 - PROJECTO E DESENVOLVIMENTO DA BANCADA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR..</b>	<b>37</b>
4.1 BANCADA EXPERIMENTAL.....	37
4.2 APARATO EXPERIMENTAL .....	40
4.3 METODOLOGIA.....	43
4.4 CALIBRAÇÃO EXPERIMENTAL .....	44
<b>CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DOS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO EM NANOFLUIDOS.....</b>	<b>55</b>
5.1 VALORES MÉDIOS DA TEMPERATURA DA PAREDE.....	55
5.2 COMPARAÇÃO DOS VALORES TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS EM POSIÇÕES AXIAIS DISTINTAS.....	56
5.3 COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO DA ÁGUA DESTILADA E DO NANOFLUIDO: COMPARAÇÃO .....	59
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>63</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>65</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>69</b>





## Índice Figuras

Figura 1 - Imagens de microscopia electrónica de varrimento, dos CNT's (a) antes e (b) após tratamento químico.....	30
Figura 2 - Curva de absorvância do nanofluido para 280 nm.....	32
Figura 3 - Estudo comparativo da Condutividade térmica efectiva da água e de 0,25% CNT's/água.....	34
Figura 4 - Variação da viscosidade em relação à tensão de corte para o nanofluido 0,25 CNT's/água.....	35
Figura 5 - Projectos desenvolvidos .....	38
Figura 6 - Projecto final da bancada experimental.....	39
Figura 7 – Aspecto da bancada final .....	40
Figura 8 - Aparato experimental do sistema de transferência de calor por convecção .....	41
Figura 9 - Fotografia da bomba peristáltica DOSE IT .....	42
Figura 10 - Fotografia do aparato experimental .....	43
Figura 11 - Comparação entre os valores médios de $h$ obtidos através de correlações empíricas para a água destilada e os valores obtidos experimentalmente, em função do comprimento do tubo.....	49
Figura 12 - Variação do número de <i>Nusselt</i> com o comprimento do tubo, para a água destilada. É feita a comparação entre os valores médios obtidos pelas correlações empíricas com os valores obtidos experimentalmente. ....	50
Figura 13 - Variação do número de <i>Nusselt</i> em função da posição axial do tubo, para a água destilada e para $Re=1650$ .....	52
Figura 14 - Variação do número de <i>Nusselt</i> em função da posição axial do tubo, para a água destilada e $Re=6183$ .....	53
Figura 15 - Variação da temperatura da parede do tubo em função da posição axial, para diferentes escoamentos. Comparação entre a água destilada e o nanofluido.....	56
Figura 16 - Comparação entre valores os experimentais e teóricos do número de <i>Nusselt</i> para a água destilada, para a posição axial $x/D=33$ .....	57
Figura 17 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de <i>Nusselt</i> para a água destilada, para a posição axial $x/D=167$ .....	57
Figura 18 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de <i>Nusselt</i> para o nanofluido 0,25% CNT's/água, para a posição axial $x/D=33$ .....	58
Figura 19 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de <i>Nusselt</i> para o nanofluido 0,25% CNT's/água, para a posição axial $x/D=167$ .....	58
Figura 20 - Comparação entre os valores experimentais da água destilada e do nanofluido 0,25CNT's/água, para diferentes escoamentos.....	59
Figura 21 - Variação do aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção, do nanofluido em relação à água destilada) com a posição axial do tubo, para diferentes escoamentos. ....	60
Figura 22 - Valores de <i>Nusselt</i> para a água destilada ao longo da posição axial, para $Re=826$ .....	73

Figura 23 - Valores de <i>Nusselt</i> para a água destilada ao longo da posição axial, para $Re=1237$ .....	73
Figura 24 - Valores de <i>Nusselt</i> para a água destilada ao longo da posição axial, para $Re=2060$ .....	74
Figura 25 - Valores de <i>Nusselt</i> para a água destilada ao longo da posição axial, para $Re=4122$ .....	74
Figura 26 - Valores de <i>Nusselt</i> para a água destilada ao longo da posição axial, para $Re=5153$ .....	75
Figura 27 - Valores de <i>Nusselt</i> para a água destilada ao longo da posição axial, para $Re=6183$ .....	75
Figura 28 - Coeficiente de convecção e o número de <i>Nusselt</i> para a água destilada ao longo da posição axial do tubo e para $Re=826$ .....	77
Figura 29 - Coeficiente de convecção e o número de <i>Nusselt</i> para a água destilada ao longo da posição axial do tubo e para $Re=1237$ .....	78
Figura 30 - Coeficiente de convecção e o número de <i>Nusselt</i> para a água destilada ao longo da posição axial do tubo e para $Re=1650$ .....	79
Figura 31 - Coeficiente de convecção e o número de <i>Nusselt</i> para a água destilada ao longo da posição axial do tubo e para $Re=2060$ .....	80
Figura 32 - Coeficiente de convecção e o número de <i>Nusselt</i> para o nanofluido 0,25%/CNT's longo da posição axial do tubo e para $Re=825$ .....	81
Figura 33 - Coeficiente de convecção e o número de <i>Nusselt</i> para o nanofluido 0,25%/CNT's longo da posição axial do tubo e para $Re=1236$ .....	82
Figura 34 - Coeficiente de convecção e o número de <i>Nusselt</i> para o nanofluido 0,25%/CNT's longo da posição axial do tubo e para $Re=1650$ .....	83
Figura 35 - Coeficiente de convecção e o número de <i>Nusselt</i> para o nanofluido 0,25%/CNT's longo da posição axial do tubo e para $Re=2061$ .....	84
Figura 36 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de <i>Nusselt</i> para a água destilada, para a posição axial $x/D=33$ .....	85
Figura 37 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de <i>Nusselt</i> para a água destilada, para a posição axial $x/D=102$ .....	85
Figura 38 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de <i>Nusselt</i> para a água destilada, para a posição axial $x/D=135$ .....	86
Figura 39 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de <i>Nusselt</i> para a água destilada, para a posição axial $x/D=167$ .....	86
Figura 40 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de <i>Nusselt</i> para o nanofluido 0,25% CNT's/água, para a posição axial $x/D=33$ .....	87
Figura 41 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de <i>Nusselt</i> para o nanofluido 0,25% CNT's/água, para a posição axial $x/D=70$ .....	87
Figura 42 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de <i>Nusselt</i> para o nanofluido 0,25% CNT's/água, para a posição axial $x/D=135$ .....	88
Figura 43 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de <i>Nusselt</i> para o nanofluido 0,25% CNT's/água, para a posição axial $x/D=167$ .....	88

Figura 44 - Comparação entre os valores experimentais do a) coeficiente de transferência de calor e do b) número de <i>Nusselt</i> para a água e o nanofluido 0,25% CNT/água ao longo da posição axial para $Re=825$ .....	89
Figura 45 - Comparação entre valores experimentais do a) coeficiente de transferência de calor e do b) número de <i>Nusselt</i> para a água e o nanofluido 0,25% CNT/água ao longo da posição axial para $Re=1236$ .....	90
Figura 46 - Comparação entre valores experimentais do a) coeficiente de transferência de calor e do b) número de <i>Nusselt</i> para a água e o nanofluido 0,25% CNT/água ao longo da posição axial para $Re=1650$ .....	91
Figura 47 - Comparação entre valores experimentais do a) coeficiente de transferência de calor e do b) número de <i>Nusselt</i> para a água e o nanofluido 0,25% CNT'/água ao longo da posição axial para $Re=2060$ .....	92



## Índice Tabelas

Tabela 1 - Condutividade térmica de aditivos e de fluidos base em sistemas de nanofluidos, (Li et al. (2009)).....	15
Tabela 2 - Sumário dos principais estudos experimentais sobre condutividade térmica de nanofluidos .....	20
Tabela 3 - Sumário dos resultados experimentais em nanofluidos com adição de CNT's .....	22
Tabela 4 - Sumário de algumas correlações existentes para o coeficiente de transferência de calor por convecção.....	27
Tabela 5 - Sumário de alguns trabalhos sobre a transferência de calor por convecção .....	28
Tabela 6 - Especificações dos nanotubos de carbono de múltiplas paredes utilizados no trabalho experimental .....	29
Tabela 7 - Especificações do espectrómetro UV.....	32
Tabela 8 - Resumo das propriedades termo-físicas dos fluidos a 300K .....	36
Tabela 9 - Temperaturas do aparato experimental para diferentes escoamentos .....	47
Tabela 10 - Variação das temperaturas experimentais e teóricas para a água destilada.....	48
Tabela 11 - Valores da estabilidade do sistema.....	71



## Nomenclatura

$\mu$	Viscosidade
$\gamma$	Tensão de corte
$\rho$	Densidade
$\phi$	Fracção volúmica
$k$	Coefficiente de Transferência de calor por condução
$h$	Coefficiente de Transferência de calor por convecção
$\dot{m}$	Caudal
$T_{in}$	Temperatura de entrada do fluido
$T_{out}$	Temperatura de saída do fluido
$T_{sup}$	Temperatura da superfície
$T_m$	Temperatura média teórica do fluido
$c_p$	Calor específico
$Nu$	Número de <i>Nusselt</i>
$Re$	Número de Reynolds
$Pr$	Número de Prantl
$x$	Distancia axial
$D$	Diâmetro interno
$L$	Comprimento do tubo
$f$	Fluido
$fb$	Fluido base
$nf$	Nanofluido





## **Capítulo 1 - Introdução**

### **1.1 Motivação**

Numa altura em que a necessidade de sistemas energéticos mais eficiente é ditada pela própria crise energética, urge dedicar consideravelmente mais atenção à investigação e desenvolvimento de novos fluidos que permitam melhores taxas de remoção de calor. É do conhecimento geral que são as limitações termofísicas dos fluidos convencionais que comprometem a eficiência energética e, portanto, a miniaturização dos próprios sistemas de permuta, limitando seriamente algumas aplicações industriais. É, neste sentido, que surge este trabalho onde se pretende melhorar as características de permuta de calor de fluidos convencionalmente utilizados em sistemas energéticos, através da adição de nanopartículas, dando-se particular atenção à utilização de nanotubos de carbono (CNTs).

### **1.2 Objectivos**

O objectivo principal da presente tese prende-se com o desenvolvimento, construção, calibração e optimização de uma bancada experimental onde se visa estudar o comportamento térmico de diferentes fluidos de permuta, nomeadamente os denominados de nanofluidos.

### **1.3 Introdução**

O presente trabalho incide no estudo dos mecanismos de transferência de calor num qualquer sistema de permuta, tendo sido desenvolvido, para o efeito, uma bancada experimental onde se reproduz um escoamento num interior de um tubo de secção circular e comprimento normalizado. Neste estudo, variáveis como a velocidade do escoamento, a temperatura do tubo, o tipo de fluido e a concentração de nanopartículas, são analisadas de modo a permitir estabelecer a sua influência relativa nos mecanismos de transferência de calor, bem como o desempenho térmico global de cada fluido testado.

Assim, opta-se por dividir este trabalho em seis capítulos, subdivididos em vários sub-temas. Assim, no capítulo 2 procede-se a uma revisão da literatura acerca de nanofluidos e suas aplicações, ao longo da qual se estabelece, de forma evidente, a relação entre as propriedades termofísicas do sistema nanofluido com o seu desempenho térmico, evidenciando-se, claramente, o potencial dos mesmos como fluidos de transporte de calor bem mais eficientes que os fluidos convencionais. Ao longo deste capítulo percebe-se que o desenvolvimento e caracterização do nanofluido não é desprovido de desafios carecendo de investigação dedicada. Assim, no capítulo três, abordam-se em detalhe as metodologias que envolvem a preparação do nanofluido, assim como a caracterização de algumas das suas propriedades termofísicas. O quarto capítulo, será reservado ao projecto e desenvolvimento da

bancada de transferência de calor, assim como à descrição do funcionamento de todo o aparato experimental projectado e desenvolvido. Ainda, neste capítulo descreve-se o processo de calibração levado a efeito no aparato experimental.

No quinto capítulo procede-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos, bem como a toda a fundamentação teórica a que se recorreu para avaliar os mecanismos de transferência de calor, quer para o fluido base (água destilada) quer para o nanofluido com 0,25% de CNT's.

No último capítulo serão apresentados as principais conclusões derivadas da realização deste trabalho, assim como a apresentação de possíveis trabalhos futuros.

## Capítulo 2 - Nanofluidos e suas aplicações

Nas últimas décadas, tem vindo a verificar-se uma evolução sem precedentes nas indústrias de electrónica, comunicações e outras tecnológicas. As crises energéticas e a escassez de espaço num mundo em crescimento, tornou a eficiência e a miniaturização as principais tendências da ciência e da tecnologia actual.

Com o aumento da potência dos equipamentos electrónicos e a redução das dimensões, houve a necessidade de desenvolver novas tecnologias de refrigeração. As tecnologias de transferência de calor à escala micro, são uma área extensivamente estudada, apresentando numerosos atributos tais como a alta eficiência térmica, dimensões e peso reduzidos e consequentemente custos de material e fabricação atenuados, no entanto são insuficientes para as necessidades actuais. Esta carência só pode ser conseguida de duas maneiras: com o desenho e desenvolvimento de novos equipamentos de refrigeração, ou através do melhoramento das capacidades térmicas dos fluidos operantes, (Choi (1998)).

Choi et al. (1995), foram os primeiros investigadores a utilizar o termo “nanofluido” em 1995, para descrever esta nova classe de nanotecnologia. O conceito de nanofluidos apareceu da necessidade de se intensificar processos de transferência de calor para elementos ópticos e aparelhos de raio X com elevadas taxas de calor. Desde então muitos investigadores têm vindo a desenvolver inúmeras experiências utilizando vários tipos de nanopartículas metálicas e não metálicas, adicionadas a um fluido base.

Actualmente estima-se que a nanotecnologia está a um nível semelhante ao desenvolvimento computacional dos anos 50. Este progresso deve-se essencialmente a indústrias, universidades e laboratórios presentes em países como a China, Japão, EUA e mesmo países Europeus que estabeleceram grupos e centros de investigação e desenvolvimento focalizados na nanotecnologia.

Com a evolução da era micro e nano tem vindo a assistir-se ao aparecimento de novas tecnologia, desenvolvendo e revolucionando diversas indústrias e aplicações, (Choi (1998)). Li et al. (2002), afirmam que, embora esta tecnologia já exista há alguns anos, a aplicabilidade prática dos nanofluidos ainda requer mais estudos, devido à disparidade de resultados obtidos pelos diferentes investigadores. No entanto, apesar destas diferenças, existe um consenso nos principais factores que afectam as propriedades de transferência de calor dos nanofluidos, sendo: o tamanho, forma e fracção volumica da nanopartícula utilizada para o reforço do fluido base, a temperatura do fluido assim como a condutividade térmica do fluido base e do tipo de nanopartículas utilizadas.

## 2.1 Sistemas de nanofluidos

Os fluidos operantes existentes na actualidade tornaram-se obsoletos, essencialmente devido à sua fraca condutividade térmica, quando comparados com os metais, ver Tabela 1. Todos os esforços para maximizar as propriedades térmicas, (i.e. aumentar a superfície de contacto ou mesmo criando turbulência), estão sempre limitados pela capacidade de condução do fluido operante. Com o intuito de ultrapassar estas limitações, estudos e experiências com fluidos contendo suspensões de partículas sólidas têm vindo a ser realizadas, desde a primeira publicação de Maxwell nos finais do século XIX (Choi (1998)). Contudo estes estudos estão limitados à utilização de partículas com escala micro, que apresentam algumas desvantagens, tais como:

1. **Sedimentação** - as partículas após algum tempo sedimentam, criando uma camada junto às superfícies reduzindo a capacidade térmica.
2. **Desgaste** - é possível reduzir a sedimentação, através do aumento da velocidade de circulação do fluido, mas com consequente aumento do desgaste dos equipamentos, tubagens, etc.
3. **Obstrução** - devido às dimensões das partículas os canais tendem a ficar obstruídos, particularmente nos estreitos canais de refrigeração.
4. **Perdas de carga** - aumentam exponencialmente.
5. **Condutividade térmica** - é proporcional à concentração de partículas, mas potenciando os problemas anteriores.

Uma das formas de resolver os problemas que advêm da utilização de micropartículas, é através da utilização de partículas à escala nano, permitindo o desenvolvimento de nanofluidos. Estes apresentam áreas de superfície extremamente elevadas possibilitando uma maior capacidade de transferência de calor comparativamente com suspensões de partículas macro e micro. Além disto, os problemas de obstrução, erosão, sedimentação e perdas de carga devem ser resolvidos devido às pequenas dimensões das partículas, comportando-se como moléculas do líquido, (Choi et al. (1995); Das et al. (2006)).

Teoricamente, todas as nanopartículas sólidas com grandes capacidades de transferência de calor podem ser utilizadas na produção de nanofluidos. As partículas mais citadas na literatura podem ser divididas em dois tipos: metálicas e não metálicas. Os fluidos base geralmente utilizadas são a água, óleo, etilenoglicol e o deceno. Geralmente a condutividade térmica dos sólidos é muito superior à dos líquidos, como está representado na Tabela 1, (Li et al. (2009)).

Tabela 1 - Condutividade térmica de aditivos e de fluidos base em sistemas de nanofluidos, (Li et al. (2009)).

Partículas	Materiais	Condutividade
		térmica (W/m K)
Metálicas	Cu	401
	Al	237
	Ag	428
	Au	318
	Fe	83,5
Não Metálicas	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40
	CuO	76,5
	Si	148
	SiC	270
	CNTs	270
	BNNTs	260 ~ 600
Fluidos base	H <sub>2</sub> O	0,613
	Etileno Glicol	0,253
	Óleo de motor	0,145

## 2.2 Desenvolvimento de nanofluidos

O desenvolvimento de nanofluidos é um factor de extrema importância para a optimização das propriedades térmicas dos fluidos base. A síntese dos nanofluidos não se resume a uma simples mistura líquido-sólido, tem que reunir determinadas condições, tais como: suspensões uniformes, estáveis e duráveis e com baixa aglomeração de partículas. Existem essencialmente dois métodos para a produção de nanofluidos, o método de passo único (*single-step method*) e o de dois passos (*two-step method*).

Akoh et al. (1978) desenvolveram um método de passo único denominado VEROS (*Vacuum Evaporation onto a Running Oil Substrate*). Este método foi inovador na produção de nanopartículas, mas apresentava grandes dificuldades na produção de partículas secas. Foi modificado para a produção de partículas metálicas de Ag e Fe, através de pulverização magnética sob alta pressão. Eastman et al. (1996) produziram nanopartículas de cobre através da condensação directa por contacto com um escoamento de vapor a baixa pressão de etileno-glicol. Outro processo de passo único denominado vacuum-SANSS (*submerged arc nanoparticle synthesis system*) ou sistema de síntese de nanopartículas por arco submerso, foi apresentado por (Lo et al. (2005)) para a preparação de nanofluidos com partículas de cobre em diferentes fluidos base.

No método de dois passos, as nanopartículas são produzidas inicialmente e posteriormente sintetizadas no fluido base. Este tem vindo a ser extensivamente utilizado na produção de nanofluidos, essencialmente devido à disponibilidade de nanopartículas por diversos fornecedores. Geralmente este método requer a utilização de aparelhos de ultra-sons para uma melhor dispersão das partículas e minimização dos aglomerados. Outros investigadores recorreram ao controlo do pH e à adição de dispersantes com o intuito de obter os mesmos resultados, contudo a adição destes químicos pode afectar a performance de transferência de calor, especialmente para temperaturas elevadas, (Wang et al. (2007)).

Comparativamente ao método de passo único, o de dois passos é o mais indicado na produção de nanopartículas de óxidos, tendo menos êxito na produção de partículas metálicas.

## 2.3 Estabilidade dos nanofluidos

Os nanofluidos não são uma simples misturas de partículas sólidas num meio líquido. Com o passar do tempo estas partículas tendem a agregarem-se devido à sua grande actividade superficial. Este problema terá consequências não só a nível da sedimentação e de obstrução dos canais, mas também a nível das propriedades termofísicas, tais como a condutividade térmica do nanofluido, (Li et al. (2009)).

Actualmente, existem alguns métodos para avaliar a estabilidade de um nanofluido. O método mais simples e mais fiável é o método da sedimentação, que consiste na observação da variação do tamanho das partículas e/ou da concentração comparativamente com o tempo de sedimentação. A única desvantagem deste método prende-se com os longos períodos de observação necessários, comparativamente com outros métodos. *Zeta potencial*, ou potencial electrocinético de sistemas coloidais, é outro método para avaliar a estabilidade de nanofluidos. (Hwang et al. (2007)) estudaram a estabilidade de nanofluidos através de um espectrofotómetro de UV. A variação da concentração dos nanofluidos pode ser obtida através de medidas de absorvância, uma vez que existe uma relação directa entre este valor e a concentração das nanopartículas.

Peng et al. (2007) estudaram os factores que influenciam a estabilidade dos nanofluidos. Concluíram que a concentração das partículas, a dispersão, a viscosidade do fluido base e o valor de pH, influenciam a estabilidade dos nanofluidos. O tipo de nanopartícula, o diâmetro e a densidade afectam de igual forma a estabilidade dos nanofluidos. Hwang et al. (2007) afirmaram que a estabilidade dos nanofluidos está directamente relacionada com as características intrínsecas das nanopartículas e dos fluidos base, tais como a morfologia e a estrutura química. As investigações levadas a cabo por (Li et al. (2007)) sugerem que o valor de pH, o tipo de dispersante e a concentração influenciam a estabilidade de suspensões de Cu/H<sub>2</sub>O.

Os métodos mencionados anteriormente, utilizados para o aperfeiçoamento da estabilidade, apenas garantem a estabilidade do nanofluido durante umas semanas ou um mês. Métodos simples e eficientes capazes de garantirem estabilidade por longos períodos de tempo ainda não se encontram disponíveis. Contudo ainda não foi possível chegar a um consenso sobre o melhor método para ser utilizado, dificultando a comparação de resultados entre investigações, (Li et al. (2009)).

## **2.4 Propriedades termo-físicas dos nanofluidos**

A condutividade térmica é a característica mais importante no que à capacidade de transferência de calor nos nanofluidos, diz respeito, existindo inúmeras publicações sobre esta matéria. A condutividade térmica de um nanofluido parece depender de inúmeros mecanismos, sendo os mais estudados os seguintes, (Godson et al. (2010)):

### **Dispersão das partículas suspensas**

A dispersão de um sistema significa que partículas com uma diferente composição sejam dispersas, mantendo esta característica durante longos períodos de tempo. O uso de dispersantes pode aumentar a estabilidade cinética, mantendo-se praticamente inalterável com o passar do tempo. Xuan et al. (2000), entre outros, afirmam que o aumento anormal da condutividade térmica se deve à dispersão uniforme das nanopartículas.

### **Escoamento turbulento**

Num escoamento turbulento, a condutividade térmica efectiva, é muito superior à de um escoamento laminar, devido aos efeitos provocados pela turbulência. Buongiorno (2006), afirma que devido ao tamanho das partículas, os efeitos provocados pela turbulência e pela dispersão, não são suficientes para explicar o aumento da condutividade térmica dos nanofluidos.

### **Movimento Browniano**

O movimento Browniano, é o movimento completamente aleatório de partículas diluídas num líquido ou num gás e que acontece devido a colisões com as moléculas do fluido base. A intensificação do movimento Browniano é directamente proporcional à temperatura e consistente com a teoria cinética das partículas. Keblinski et al. (2002), sugeriram que o mecanismo principal responsável pelo aumento da condutividade térmica num nanofluido, é a transferência de energia devido à colisão de partículas mais quentes com partículas com temperaturas inferiores. A eficiência do movimento Browniano é inversamente proporcional ao aumento da viscosidade.

### **Efeito Sóret**

O efeito de Sóret é um fenómeno observado aquando da mistura de dois ou mais tipos de partículas móveis, sujeitos a um gradiente de temperatura. Este fenómeno é mais significativo nos

processos de convecção natural, onde o escoamento é conduzido por impulsão hidrostática e pelas diferenças de temperatura. O processo de transferência de calor aumenta com a diminuição da densidade do fluido, (Godson et al. (2010)).

### **Osmose**

A osmose é um fenómeno que ocorre quando há uma migração das partículas de uma concentração mais baixa para uma concentração mais elevada. Contudo isto não é uma condição favorável nos nanofluidos, pois estes podem perder as características não aglomerantes, (Godson et al. (2010)). Buongiorno (2006)) referiu que o movimento Browniano, o efeito de Soret e a osmose, têm influência nos efeitos provocados pela turbulência.

### **Influência dos fluidos base**

Apesar da importância das nanopartículas na transferência de calor, a temperatura e a viscosidade do fluido base, também influenciam os resultados da condutividade térmica. No entanto, a literatura existente é escassa e uma maior investigação é necessária, (Godson et al. (2010)).

Xie et al. (2002), concluíram que em suspensões utilizando as mesmas nanopartículas, a condutividade térmica diminui com o aumento da condutividade térmica do fluido base. Resultados semelhantes foram obtidos por (Hwang et al. (2007)) em sistemas de nanofluidos CuO/ EG e H<sub>2</sub>O.

Peterson et al. (2006), examinaram os efeitos da variação da temperatura e da fracção volúmica, na condutividade térmica de suspensões de nanopartículas de CuO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. As partículas apresentavam diâmetros de 29 a 36 nm e encontravam-se diluídas em água com fracções volúmicas de 2 a 10%. Os resultados experimentais foram avaliados para temperaturas de 300,7 a 307,9 K, concluindo que o material, fracção volumétrica e a temperatura das partículas, têm todos influência directa na condutividade térmica. Estudos realizados por Das et al. 2003, Patel et al. (2003) entre outros, também obtiveram resultados semelhantes. Yang et al. (2006) estudaram a dependência da condutividade térmica em *nanorods* de Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, e chegaram à conclusão que a condutividade térmica diminui com o aumento da temperatura. Esta discrepância de resultados pode ser devido à diferença do factor de forma, que poderá influenciar o movimento Browniano e a difusividade do nanofluido.

## **2.5 Medição da condutividade térmica dos nanofluidos**

Existem vários métodos para a determinação da condutividade térmica: oscilações de temperatura, placas paralelas em regime permanente (*Steady-state parallel plate*) e a técnica do fio quente transiente (*transiente hot wire*), sendo esta última a mais utilizada, (Li et al. (2009)).

A técnica do fio quente, funciona medindo a resposta temperatura/tempo do fio a um pulso eléctrico abrupto. O fio é usado como aquecedor e termómetro, sendo a condutividade térmica



calculada através de uma derivação da lei de Fourier. De um modo geral, os nanofluidos são bons condutores de corrente eléctrica, dificultando a aplicação directa da técnica do fio quente. Com o intento de minimizar problemas associados à leitura da condutividade térmica, o fio é revestido com uma camada isolante. Zhang et al. (2007) apresenta medidas exactas para a condutividade térmica efectiva, utilizando a técnica do fio quente curto (*short-hot-wire*), de modo a minimizar a influência de cargas estáticas e da condutividade eléctrica das nanopartículas, nos resultados obtidos. Das et al. (2003) afirmaram que a devido à possibilidade de uma concentração de iões do fluido condutor à volta do fio quente pode influenciar a exactidão dos resultados experimentais.

Czarnetzki et al. (1995) desenvolveram o método de oscilação de temperatura. Este método é unicamente térmico, sendo os componentes eléctricos do aparelho removidos da zona de teste, impedindo que o movimento dos iões tenha qualquer influência nos resultados obtidos.

As nanopartículas de Alumina e óxido de cobre são as mais económicas, assim sendo as mais utilizadas pelos investigadores nas suas experiências. Todos os resultados experimentais demonstraram um aumento da condutividade térmica com a adição deste tipo de nanopartículas. Eastman et al. (1996) utilizaram as partículas mencionadas anteriormente e partículas de cobre, diluídas em dois fluidos base: água e óleo de hidrocarbonetos (HE 200 oil). Os resultados obtidos demonstraram que uma concentração de 5% de nanopartículas, correspondia um aumento de 60% da condutividade térmica, comparativamente com o fluido base. Analogamente demonstraram que o uso de partículas de cobre, obtidas pelo método de passo único (*one-step method*), apresentam melhores resultados do que as de óxido de cobre obtidas pelo método de dois passos, (*two-step method*).

Na Tabela 2 é apresentada uma lista dos principais estudos encontrados na literatura, bem como as principais conclusões.

Tabela 2 - Sumário dos principais estudos experimentais sobre condutividade térmica de nanofluidos

Sistema	Síntese	Fracção volúmica (vol%)	Tamanho partícula (nm)	Aumento cond. térmica (%)	Investigador
Cu/EG	Passo único	0,3	10	40	Eastman et al. (2001)
Cu/H <sub>2</sub> O	Passo único	0,1	75-100	23,8	Liu et al. (2006)
Cu/H <sub>2</sub> O	Dois passos	7,5	100	78	Xuan et al. (2000)
Fe/EG	Passo único	0,55	10	18	Hong et al. (2005)
Ag/tolueno	Dois passos	0,011	60-80	16,5 (60°C)	Patel et al. (2003)
Au/tolueno	Dois passos	0,00026	10-20	21 (60°C)	Patel et al. (2003)
Au/etanol	Dois passos	0,6	4	1,3±0,8	Putnam et al. (2006)
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O	Passo único	4	10	38	Zhu et al. (2006)
TiO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	Dois passos	5	15	30-33	Murshed et al. (2005)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O	Dois passos	5	20	20	Xie et al. (2002)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /EG	Dois passos	0,05	60	29	Xie et al. (2002)
CuO/H <sub>2</sub> O	Dois passos	5	33	11,5	Zhang et al. (2006)
SiC/H <sub>2</sub> O	Dois passos	4,2	25	15,9	Xie et al. (2002)
H <sub>2</sub> O/FC-72	Dois passos	12	9,8	52	Yang et al. (2006)

## 2.6 Condutividade térmica em sistemas de nanofluidos com adição de nanotubos de carbono (CNT's)

Os maiores aumentos da condutividade térmica em nanofluidos têm sido observados para sistemas com suspensões de nanotubos de carbono (CNT's), os quais apresentam valores elevados de razão de aspecto e de condutividade térmica. O primeiro trabalho publicado sobre a síntese de nanotubos, foi dirigido por (Iijima (1991))

Posteriormente, Choi et al. (2001) investigaram nanofluidos constituídos por nanotubos de carbono de parede múltipla ou MWNT's (*Multiwalled carbon nanotube*) adicionados a óleo ( $\alpha$ -olefin), com o intuito de medir a condutividade térmica efectiva. Os resultados experimentais chocaram os investigadores, tendo obtido resultados muito superiores aos indicados pelas previsões dos modelos teóricos. Comparativamente com outros sistemas de nanofluidos, os nanotubos permitiram observar os maiores aumentos de condutividade térmica, proporcionando novas oportunidades e aplicações.

Xie et al. (2003) propuseram um método para produzir suspensões estáveis e homogêneas de CNT's diluídos em água destilada e Etileno glicol e deceno. Os resultados experimentais indicaram que a condutividade térmica aumenta com o aumento da fracção volúmica de nanotubos e decresce com o aumento da condutividade térmica do fluido base.

Biercuk et al. (2002) mediram a condutividade térmica de suspensões de nanotubos de carbono de parede simples (SWNT's – *Single wall carbon nanotubes*) e de fibras de carbono em epoxy, crescidas por vapor (VGCF – *Vapor grown carbon fibers*). Os resultados demonstraram uma melhoria de 125% e 45% para uma percentagem mássica de 1,0 wt% de SWNT's e de VGCF, respectivamente. Comparativamente com os resultados de (Choi et al. (2003)) para SWNT's-epoxy, os valores obtidos demonstram uma melhoria semelhante para a condutividade térmica. Eles ainda afirmaram que os aglomerados de nanotubos podem ser um dos factores mais importantes na transferência de calor.

Wen et al. (2004) investigaram os efeitos da temperatura na condutividade térmica de sistemas de nanofluidos de MWCNT's/água. Os resultados obtidos indicam que para temperaturas inferiores a 303,15 K, existe aproximadamente uma dependência linear da condutividade térmica com a temperatura. Contudo para valores superiores a 303,15 K, esta dependência não pode ser verificada. Ding et al. (2006) também demonstraram que a condutividade térmica efectiva aumenta com o aumento da temperatura para sistemas de CNT/água. Eles descobriram que o aumento da condutividade térmica é ligeiramente superior aos dados reportados por Xie et al. (2003; Assael et al. (2004); Wen et al. (2004) mas muito inferiores aos demonstrados por Choi et al. (2001). A disparidade de resultados entra os diferentes grupos de investigação, pode ser explicada devido às propriedades dos CNT's usados, a sua razão de aspecto, a inclusão ou não de dispersantes e à ocorrência de erros experimentais.

Ponmozhi et al. (2010), desenvolveram nanofluidos à base de água e CNT's sem o recurso a dispersantes. Recorreram ao tratamentos químico à base de ácidos e utilizaram os ultrasons de modo a dispersar a suspensão de nanopartículas. Os resultados obtidos demonstram um aumento da condutividade térmica proporcional à fracção volúmica de nanotubos, obtendo valores máximos para a condutividade térmica, acima dos 100% e para uma temperatura de 333,15 K e para todas as fracções volúmicas, testadas.

Lamas et al. (2010), estudaram a estabilidade coloidal de nanofluidos com CNT's diluídos em etilenoglicol, concluindo que estes permaneciam estáveis após 100h da sua preparação, analogamente afirmaram que a estabilidade é influenciada pelo tempo na qual a mistura é exposta aos ultrasons. A condutividade térmica apresentou valores com melhorias na ordem dos 17% para uma concentração de 1,5 vol% de MWCNTs. Esses estudos também demonstraram que a viscosidade aumentava para todas as concentrações de MWCNT's, deixando antever que o movimento Browniano não será o único responsável pelo aumento da condutividade térmica efectiva destes sistemas.

Com a leitura dos textos anteriores e através dos sumários expressos nas Tabela 2 e 3, pode-se afirmar que os dados experimentais disponíveis dos diferentes grupos de investigação variam amplamente, evidenciando que muito trabalho precisa ainda ser feito, de modo a que os mecanismos intrínsecos a estes sistemas possam ser mais amplamente compreendidos.

Tabela 3 - Sumário dos resultados experimentais em nanofluidos com adição de CNT's

Sistema	Síntese	Fracção Volúmica (vol%)	Tamanho partícula (nm)	Aumento cond. térmica (%)	Investigador
MWNT/óleo	Dois passos	1,0	Ø25 x 50 µm	>250	Choi et al. (2001)
SWNT/epoxy	Dois passos	1,0 wt%	Ø3-30	125	Biercuk et al. (2002)
TCNT/água	Dois passos	1,0	Ø15 x 30 µm	7,0	Xie et al. (2003)
TCNT/EG	Dois passos	1,0	Ø15 x 30 µm	12,7	Xie et al. (2003)
TCNT/deceno	Dois passos	1,0	Ø15 x 30 µm	19,6	Xie et al. (2003)
SWNT/epoxy	Dois passos	3,0 wt%	Ø20-30 x 200	300	Choi et al. (2003)
CNT/água	Dois passos	0,84	Ø200-600 µm	31	Wen et al. (2004)
MWNT/água	Dois passos	0,6	Ø130 x 10 µm	34	Assael et al. (2004)
CNT/EG	Dois passos	1	Ø20-30	12,4	Liu et al. (2005)
CNT/óleo	Dois passos	2	Ø20-30	30	Liu et al. (2005)
MWCNT's/água	Dois passos	0,25 - 2	Ø50-80	100	Ponmozhi et al. (2010)
MWCNT's/EG	Dois passos	1,5	Ø50-80	17	Lamas et al. (2010)

## 2.7 Estudos analíticos da Condutividade térmica

Através do trabalho experimental de muitos investigadores, é indiscutível que a condutividade térmica dos nanofluidos depende de diversos factores, tais como: a condutividade térmica do fluido base e do tipo de nanopartículas, da fracção volúmica e da área de superfície de contacto das suspensões, da geometria e dos movimentos estocásticos das partículas, da temperatura do fluido base e da interacção das diferentes camadas líquido-sólido.

Nos últimos anos muitos esforços foram realizados para prever o comportamento da condutividade térmica dos nanofluidos, esta afirmação é baseada nos trabalhos experimentais e analíticos e no número de modelos propostos. Contudo até ao presente nenhum modelo apresentado conseguiu prever o comportamento da condutividade térmica dos diferentes sistemas nanofluidos.

Maxwell (1881), foi o primeiro a apresentar um modelo para a condutividade térmica de suspensões homogêneas de partículas macroscópicas:

$$k_f = \frac{k_p + 2k_{fb} + 2(k_p - k_{fb})\phi}{k_p + 2k_{fb} - (k_p - k_{fb})\phi} k_{fb} \quad \text{Eq. 1}$$

onde  $k_p$  representa a condutividade térmica das partículas sólidas,  $k_{fb}$  a condutividade térmica do fluido base e  $\phi$  a fracção volúmica das partículas na suspensão. Este modelo demonstra a que a condutividade térmica efectiva, depende da condutividade térmica das partículas e do fluido base assim como da fracção volúmica.

A grande limitação do modelo de Maxwell (1881) era que apenas considerava partículas esféricas, negligenciando outros factores tais como, o diâmetro, a área, a geometria, o movimento Browniano e o interface entre as partículas sólidas e o fluido base, entre outros. Consequentemente, comparando com os dados obtidos experimentalmente, a equação de Maxwell (1881) prevê valores para a condutividade térmica subestimados.

Conquanto muitos modelos foram apresentados, ainda existem muitos fenómenos de transferência de calor nos nanofluidos que não são compreendidos. Nenhum dos modelos teóricos propostos consegue prever satisfatoriamente a condutividade térmica dos nanofluidos. A necessidade de mais dados experimentais e mais trabalho experimental é essencial de modo a obter-se um modelo versátil e preciso.

## 2.8 Viscosidade dos nanofluidos

A maior parte dos trabalhos publicados nos últimos anos, focam essencialmente o comportamento da transferência de calor e a estabilidade dos nanofluidos. No entanto, a viscosidade é uma das principais propriedades dos nanofluidos. Um aumento da condutividade térmica é esperada, sem afectar as perdas de carga e isto está directamente relacionado com a viscosidade do nanofluido. Os poucos trabalhos que existem sobre a viscosidade, focados nos factores que influenciam a viscosidade, estes incluem a concentração e tamanho das partículas, temperatura dos nanofluidos, etc..

Prasher et al. (2006) investigaram a viscosidade de nanofluidos de alumina. Os resultados obtidos mostraram que a viscosidade relativa não dependia da temperatura nem do diâmetro das partículas, mas da fracção volúmica das nanopartículas. Chen et al. (2009) estudaram nanofluidos de titania diluídos em EG, demonstrando que os nanofluidos apresentavam comportamento newtoniano num intervalo de temperaturas entre 293 a 333K e num período de  $0,5-10^4 \text{ s}^{-1}$ , concluindo que a viscosidade dependia fortemente da temperatura e da concentração das partículas.

Das et al. (2003) mediram a viscosidade de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em água em função da tensão de corte. Os resultados obtidos demonstram um aumento da viscosidade com o aumento da concentração das nanopartículas. Existe uma forte possibilidade dos nanofluidos serem fluidos não – Newtonianos e em certos casos, terem comportamentos viscoelásticos. A definição de um modelo para a viscosidade dos nanofluidos ainda necessita de bastante trabalho experimental, de modo a ser possível realizar simulações numéricas. Ding et al. (2006) mediram a viscosidade de nanofluidos de CNT/água em função da taxa de corte. Concluíram que a viscosidade aumentava com o aumento da concentração das nanopartículas e com a diminuição da temperatura. Além disto, comportamentos de pseudoplasticidade foram observados pelos investigadores. Isto significa, que os nanofluidos podem proporcionar uma melhor performance do escoamento com o aumento da tensão de corte nas paredes, resultando numa viscosidade mais baixa.

## 2.9 Transferência de calor por convecção em nanofluidos

Na última década muitos investigadores realizaram inúmeras experiências, com o intuito de explicar os fenómenos de transferência de calor em sistemas de nanofluidos. Contudo, a transferência de calor por convecção tem recebido muito pouca atenção, comparativamente com a condução. Actualmente, existem poucas publicações que abordam a transferência de calor por convecção, sendo as mais importantes descritas de seguida.

Li et al. (2002; Xuan et al. (2003) apresentaram um sistema experimental de modo a investigar a transferência de calor por convecção e o factor de atrito de nanofluidos, para escoamentos em regime laminar e turbulento. Os nanofluidos utilizados eram compostos por partículas de Cu misturadas com água destilada, com diâmetros inferiores a 100 nm. Através da variação da fracção volúmica das partículas, foi possível determinar o efeito da concentração das nanopartículas no coeficiente de transferência de calor. Utilizaram concentrações volúmicas de 0,3 e 2% e realizaram estudos para números de Reynolds ( $Re$ ) numa gama de 800 a 25000. O aparato experimental era composto essencialmente por um reservatório, uma bomba, tubagens, uma zona de teste, um refrigerador e um tanque de recolha. A zona de teste era composta por um tubo de bronze com um diâmetro interno de 10 mm e um comprimento de 800 mm e um aquecedor eléctrico utilizado para manter um fluxo constante de calor nas paredes do tubo. Com o intuito de minimizar os aglomerados de partículas, foi diluído no fluido base um ácido gordo (*fatty acid*), de modo a dispersar e envolver as nanopartículas.

Os resultados experimentais demonstraram que o coeficiente de transferência de calor por convecção varia com a velocidade do escoamento e a fracção volúmica das partículas. Comparativamente com o fluido base, o número de *Nusselt* ( $Nu$ ) para o nanofluido com uma fracção volúmica de 2 vol% aumentou 39%. Afirmaram analogamente, que os valores obtidos pela equação de Dittus-Boelter para o número de *Nusselt*, não eram capazes de prever o mesmo. Através dos dados obtidos experimentalmente, foi possível criar novas correlações para a previsão do coeficiente de

transferência de calor, obtendo a equação para o número de *Nusselt*, para um escoamento no interior de um tubo, presente na Tabela 4.

Yang et al. (2005) realizaram experiências em nanofluidos de grafite em água, com o intuito de determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção, em regime laminar num tubo horizontal. Neste estudo foram utilizadas nanopartículas de diferentes fornecedores, dando uma maior ênfase à razão de aspecto, cerca de 0,02. A baixa razão de aspecto é essencial, pois partículas com elevadas razões de aspecto podem aumentar dramaticamente a viscosidade. Nesta experiência, foram utilizados dois tipos de nanofluidos com diferentes fluidos base e utilizados os seguintes parâmetros: o caudal numa gama de 62 a 507 cm<sup>3</sup>/min. O número de Reynolds de 5 a 110 e a temperatura de aquecimento entre 323,2 a 343,2 K. O objectivo principal deste estudo, visa compreender os efeitos causados pelo número de Reynolds, a fracção volúmica, a temperatura, o fornecedor das nanopartículas e o tipo de fluido base na determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção.

Os resultados experimentais apresentados, traduzem um aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção com o aumento do número de Reynolds e da fracção volúmica das nanopartículas. Comparativamente com o fluido base, nanofluidos com 2wt% de grafite apresentam um ligeiro aumento do coeficiente de transferência de calor, mas para uma concentração de 2.5 wt% o aumento foi cerca de 22% para uma temperatura de 323,2 K e 15% para uma temperatura de 343,2 K. Os valores obtidos podem ser explicados por diversos factores, tais como: o alinhamento rápido das nanopartículas em fluidos menos viscosos, induzindo um menor contacto entre as nanopartículas a depleção das partículas na fronteira entre o fluido e as paredes da tubagem, que pode induzir uma diminuição da condutividade térmica junto à parede do tubo. Afirmaram igualmente que a correlação estabelecida por (Li et al. (2002)) para o regime laminar sobre-estima o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Wen et al. (2004) investigaram a transferência de calor por convecção de nanopartículas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> suspensas em água destilada, em regime laminar. Foram testadas várias fracções volumicas, para um fluxo de calor constante nas paredes do tubo. Os resultados demonstraram um aumento do coeficiente de transferência de calor maior que 41% para uma fracção volúmica de  $\phi=1,6\%$ , variando igualmente com o número de Reynolds. Na região de entrada do fluido, em particular, o uso de nanofluidos aumentou consideravelmente o coeficiente de convecção causando uma diminuição da camada limite térmica, sendo este efeito minimizado ao longo do comprimento do tubo. Além disto, as correlações de Shah para um regime laminar e de Dittus-Boelter para regime turbulento, não conseguem prever os valores obtidos experimentalmente.

Eastman (1999) conduziu experiências para determinar a performance térmica de nanofluidos de Cu diluídos em água, para um regime turbulento. Os resultados obtidos para uma

concentração de  $\varphi=0,9\%$  demonstraram um aumento superior a 15% no coeficiente de transferência de calor por convecção, comparativamente com os resultados obtidos para a água.

Pak et al. (1998) apresentaram uma investigação sobre o coeficiente de transferência de calor por convecção, em sistemas de nanofluidos composto por  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$ . Numa concentração entre 1 a 3%, em regime turbulento  $Re=10^4$ - $10^5$  concluíram que o número de *Nusselt* aumenta com o aumento da fracção volúmica e do número de Reynolds.

Zeinali Heris et al. (2007) investigaram o coeficiente de transferência de calor por convecção para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Água para um regime laminar e temperatura constante nas paredes do tubo de teste. Para concentrações de  $\varphi=0,2 - 2,5\%$  e para Reynolds de 700 a 2050, concluíram que o número de *Nusselt* dos nanofluidos é superior ao do registado pela água e o coeficiente de transferência de calor por convecção aumenta com o aumento a fracção volúmica.

Maiga et al. (2004), utilizaram nanofluidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dissolvidos em água e etileno glicol, de modo a estudar os efeitos da convecção forçada num tubo de geometria circular. Para o regime laminar os resultados obtidos demonstram um aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção com o aumento da concentração de nanopartículas e em particular para o final do tubo, apresenta aumentos de cerca de 60%. Igualmente concluíram que os sistemas  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$  apresentam valores para a convecção superiores aos obtidos pelos sistemas  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Água}$ , para a mesma concentração. Para o regime turbulento, o coeficiente de transferência de calor por convecção aumenta substancialmente na região de entrada.

Hwang et al. (2009), mediram as perdas de carga e o coeficiente de transferência de calor de nanofluidos contendo nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  diluídas em água e investigaram as suas características através de um tubo uniformemente aquecido, para um regime laminar completamente desenvolvido. Os resultados experimentais demonstram que o factor de atrito está de acordo com as correlações teóricas para um escoamento de fase única (*single phase*). Contudo, o coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos, para o mesmo número de Reynolds, aumenta cerca de 8% para uma concentração de 0.3 vol% de nanopartículas, comparativamente com os valores obtidos para a água pura. Do mesmo modo, os resultados experimentais da convecção, demonstram uma melhoria superior à obtida para a condutividade térmica, com a mesma fracção volúmica. Outra conclusão obtida pelos investigadores, foi a incapacidade das correlações do coeficiente de transferência de calor de Shah, em prever o coeficiente de transferência de calor por convecção, afirmando que esta discrepância, se deve a um novo mecanismo de transferência de calor envolvendo os nanofluidos. Ao estudarem o comportamento dos nanofluidos perante a variação dos números de Reynolds, concluíram que o coeficiente de transferência de calor mantém-se aproximadamente constante, para um regime laminar completamente desenvolvido. Esta afirmação contraria os resultados obtidos por outros investigadores acima citados, que obtiveram um aumento do coeficiente de transferência de



calor, para a região de entrada. Esta afirmação evidencia que o coeficiente de transferência de calor para estes nanofluidos, apresenta um valor constante semelhante ao obtido para um escoamento laminar de um fluido de fase única (*single-phase flow*).

Actualmente não existem muitos trabalhos publicados sobre este tema, contudo, os nanotubos de carbono são as partículas que apresentam um maior aumento no que toca à condutividade térmica, sendo, esperados melhoramentos semelhantes para a convecção.

Ding et al. (2006), investigaram a transferência de calor por convecção para nanofluidos contendo nanotubos de carbono. Os resultados obtidos demonstram um aumento significativo do coeficiente de transferência de calor por convecção. Este aumento varia consoante as condições do escoamento, a concentração de CNT's e do valor de pH. Para nanofluidos contendo 0,5wt% CNT's, obtiveram um aumento máximo de 350% para  $Re=800$  e para a posição axial  $x/D=110$ . Contudo não foram capazes de identificar as razões para tal melhoria, apontando como possíveis razões o alinhamento das partículas, redução da espessura da camada limite térmica, devido à presença de nanopartículas e o elevado rácio do factor de forma.

As tabelas 4 e 5, resumizam as correlações, bem como as principais experiências, conclusões, sobre o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Tabela 4 - Sumário de algumas correlações existentes para o coeficiente de transferência de calor por convecção

Regime de escoamento	Correlações	Investigador
Laminar	$Nu_f = 0,4328(1 + 11,285\phi^{0,754}Pe_d^{0,218})Re_f^{0,333}Pr_f^{0,4}$	Li e Xuan
Turbulento	$Nu_f = 0,0059(1 + 7,6286\phi^{0,6686}Pe^{0,001})Re^{0,9238}Pr^{0,4}$	Xuan e Li
Turbulento	$Nu = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,5}$	Pak et al. (1998)
Laminar	$Nu = 0,86Re^{0,55}Pr^{0,5}$ para fluxo de calor constante $Nu = 0,86Re^{0,35}Pr^{0,36}$ para temperatura constante na parede	Maiga et al. (2005)
Turbulento	$Nu = 0,085Re^{0,71}Pr^{0,35}$	Maiga et al. (2004)

Tabela 5 - Sumário de alguns trabalhos sobre a transferência de calor por convecção

Nanofluido	Geometria experimental	Regime de escoamento	Conclusões	Investigador
Cu/Água	Tubo D=10mm; L=800 mm	Turbulento $Re=10^4$ - 25000	CTC conv. Aumenta com o aumento de $\varphi$ e de $Re$	Xuan et al. (2003)
Cu/Água	Tubo D=10mm L=800mm	Laminar $Re=800$ -2100	CTC conv. Aumenta com o aumento de $\varphi$ e de $Re$	Li et al. (2002)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Água (27-56nm)	Tubo D=4,5 mm; L=980mm	Laminar $Re=500$ -2100	CTC conv. Aumenta 41% para $\varphi=1,6$	Wen et al. (2004)
CNT/água	Tubo D=4,5; L=970mm	Laminar $Re=800$ -1200	Aumento de 350% para 0,5 wt% e $Re=800$	Ding et al. (2006)
Grafite/Óleo	Tubo D=4,57mm; L=457mm	Laminar $Re=5$ -110	CTC conv. para 2,5 wt% é 22% superior aos 55°C	Yang et al. (2005)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Água TiO <sub>2</sub> /Água	Tubo D=1,1cm L=480mm	Turbulento $Re=10^4$ - $10^5$	$Nu$ aumenta com o aumento de $\varphi$ e $Re$	Pak et al. (1998)
CuO/Água		Turbulento	CTC aumenta 15% em relação à água	Eastman (1999)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Água CuO/Água	Tubo D=6mm L=1m	Laminar $Re=650$ -2050	CTC aumenta com $\varphi$ e $Nu$ é maior	Zeinali Heris et al. (2006)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Água	Tubo D=6mm L=1000m	Laminar $Re=700$ -2050	CTC aumenta 22% com $Pe$ e com $\varphi$	Zeinali Heris et al. (2007)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Água Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /EG		Laminar e Turbulento	CTC aumenta cerca de 60% e para o regime turbulento aumenta com $Re$ .	Maiga et al. (2004)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Água	Tubo D=1,8mm L=2500	Laminar	CTC aumenta com $\varphi$ e constante com $Re$	Hwang et al. (2009)

Legenda: CTC – Coeficiente de transferência de calor

## Capítulo 3 - Caracterização do nanofluido

A caracterização experimental dos nanofluidos é um dos processos fundamentais para a realização desta dissertação, uma vez que a literatura é escassa no que a estes fluidos diz respeito, e todos os pressupostos terão repercussões nos resultados e cálculos subsequentes.

Na primeira parte deste capítulo, será feita uma descrição de todo o processo que envolve a produção de um nanofluido, desde o tratamento químico dos nanotubos de carbono, até ao estudo da estabilidade coloidal do nanofluido. A segunda parte do capítulo será dedicada à caracterização de algumas propriedades termofísicas do nanofluido, nomeadamente, condutividade térmica, viscosidade, densidade e calor específico, sendo essenciais para determinar posteriormente o coeficiente de transferência de calor por convecção.

### 3.1 Materiais

Os nanotubos de carbono de múltiplas paredes (MWCNT's) foram adquiridos à empresa "Cheap Tubes Inc, USA", sendo as suas especificações listadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Especificações dos nanotubos de carbono de múltiplas paredes utilizados no trabalho experimental

Propriedades	Especificações
Diâmetro externo	50 – 80 nm
Diâmetro interno	5-10 nm
Comprimento	10-20 $\mu\text{m}$
Pureza	95%
Área específica da superfície	60 $\text{m}^2/\text{g}$
Condutividade eléctrica	>10 S/cm

Foi feita uma análise por microscopia electrónica de varrimento (SEM) para aferir as propriedades morfológicas dos CNTs.

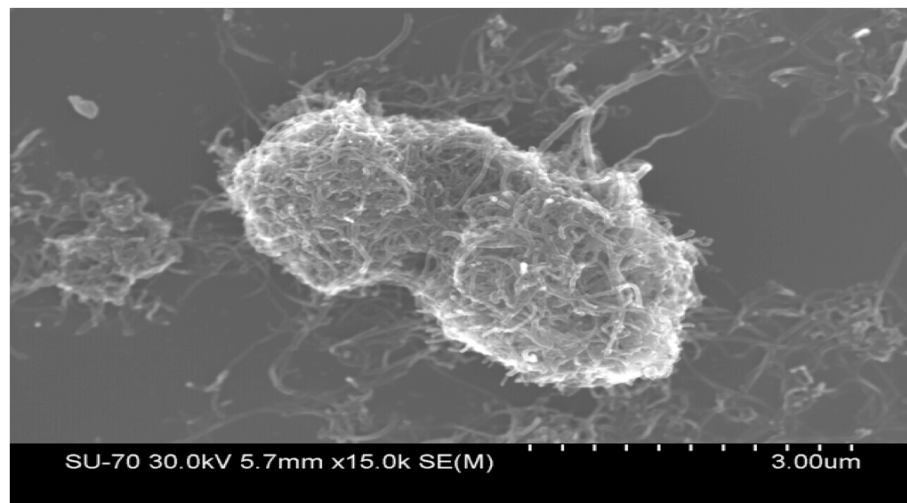
Na Figura 1(a) apresenta-se uma imagem SEM dos CNTs tal como comprados. Verifica-se que os CNT's se encontram completamente aglomerados. Assim, torna-se premente efectuar um tratamento químico por forma a promover a desaglomeração destes e torna-los miscíveis em fluidos.

### 3.2 Tratamento químico dos CNT's

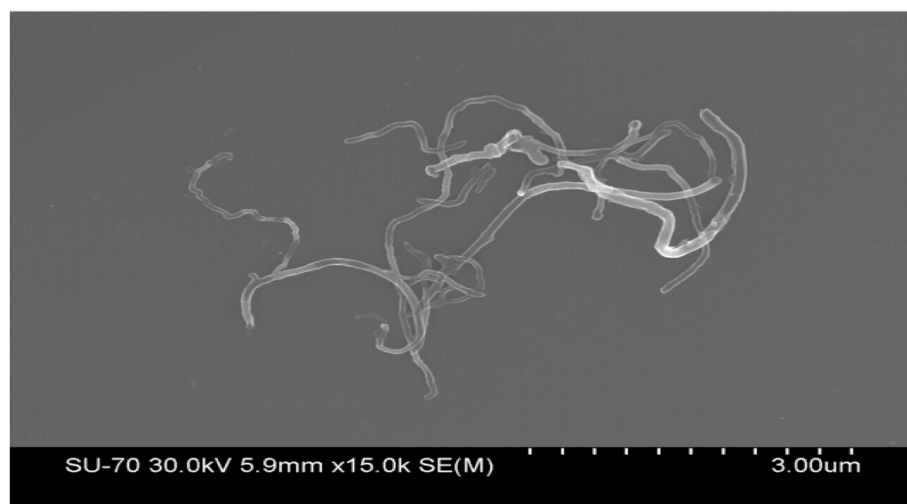
De modo a promover a desagregação dos CNT's e introduzir grupos funcionais hidrófilos na superfície dos mesmos, por forma a possibilitar uma boa homogeneidade dos CNTs no fluido base, foi

efectuado um tratamento superficial dos nanotubos com ácido sulfúrico e nítrico. O procedimento utilizado para o tratamento químico foi adaptado do descrito por (Esumi et al. (1996)). A quantidade requerida de CNT's foi diluída numa mistura de ácido sulfúrico (95-97%) e ácido nítrico (65%) numa fracção de 3:1 e aquecida a uma temperatura de 413,2 K durante 30 min. Posteriormente, os CNT's foram lavados com água destilada até se atingir um pH de aproximadamente 7. Seguidamente foram secos numa estufa a uma temperatura de 373,2 K. Finalmente, os CNT's secos são moídos num moinho, antes de serem misturados com o fluido base.

Na Figura 1 (b) apresenta-se uma imagem SEM dos CNTs após tratamento químico. Na imagem verifica-se que os CNTs não estão aglomerados, e que detêm grande parte das suas características morfológicas após o tratamento químico.



(a)



(b)

Figura 1 - Imagens de microscopia electrónica de varrimento, dos CNT's (a) antes e (b) após tratamento químico.

### 3.3 Preparação dos nanofluidos

A preparação de nanofluidos estáveis é um processo de extrema importância para a otimização das características térmicas dos mesmos, uma vez que todas as propriedades dependem da homogeneidade do nanofluido produzido.

O plano de experiência que se pretende realizar no âmbito deste trabalho de investigação inclui o teste da água enquanto fluido base e de nanofluidos de base aquosa, com adição de CNTs. A selecção de tais fluidos prende-se essencialmente com o facto de parte das características termo-físicas desses fluidos já terem sido alvo de análise por parte do grupo de investigação MouldMADE, (Ponmozhi et al. (2010) e Lamas et al. (2010)) e por limitações de equipamento laboratorial já *in-situ* (nomeadamente a bomba peristáltica com um máximo de 500 rpm, o que impõe limitações de bombagem em fluidos com viscosidades superiores, limitando o leque de experiências no que ao escoamento diz respeito). Assim para a preparação do nanofluido foi utilizado o seguinte procedimento experimental:

1. Cálculo da quantidade de CNTs necessária para preparar um nanofluido com uma concentração volúmica de 0.25% de CNT, e para um volume de nanofluido total de 300ml (volume de fluido mínimo necessário ao plano de experiências que se descreverá nos capítulos subsequentes)
2. Adição de CNTs pesados ao fluído base (água destilada)
3. Sujeição da mistura a ultra-sons e optimização do tempo de mistura, de modo a melhorar a homogeneidade da mesma. Para o nanofluido preparado, o tempo de mistura optimizado foi de 1hora.

Verificou-se (a olho nú) que após 24h da preparação, o nanofluido continuava estável, isto é, não apresentava qualquer tipo de sedimentação, o que indica que o mesmo se encontra estável e pronto a ser utilizado.

### 3.4 Estudo da estabilidade dos nanofluidos

Tal como foi referido no capítulo anterior, a estabilidade coloidal de um sistema de nanofluidos pode ser medida através de espectrofotometria com raios ultravioleta (UV), tendo sido esta técnica a utilizada para aferir a estabilidade coloidal do nanofluido preparado. Foi utilizado o UV-mini-1240 adquirido à Shimadzu corporation, que utiliza duas fontes de luz: uma fonte de deutério para os raios UV e outra de tungsténio de 20W para a luz visível. O feixe de luz atravessa a amostra atingindo uma rede de difracção, que permite escolher o comprimento de onda de análise. Algumas das especificações do espectrofotómetro estão expressas na Tabela 7.

Tabela 7 - Especificações do espectrómetro UV

Propriedades	Especificações
Largura de banda espectral	5 nm
Intervalo de comprimento de onda	190 – 1100 nm
Velocidade de rastreio (scan speed)	24 – 1400 nm/min
Intervalo de absorvância	-3,99 – 3,99 Abs
Intervalo de transmissão	-399 – 399%

A metodologia utilizada para aferir a estabilidade dos nanofluidos, pode ser descrita do seguinte modo:

1. O nanofluido é diluído, para permitir que a radiação seja transmitida;
2. Calibra-se o espectrofotómetro, sem amostra, para o comprimento de onde pretendido.
3. A amostra é colocada numa célula própria e é realizada a medição
4. Cada experiência pode demorar até 600h

Os dados obtidos para o nanofluido preparado 0,25% CNT's/água destilada foram obtidos para um tempo de aquisição de 72h e os resultados obtidos estão apresentados na Figura 2.

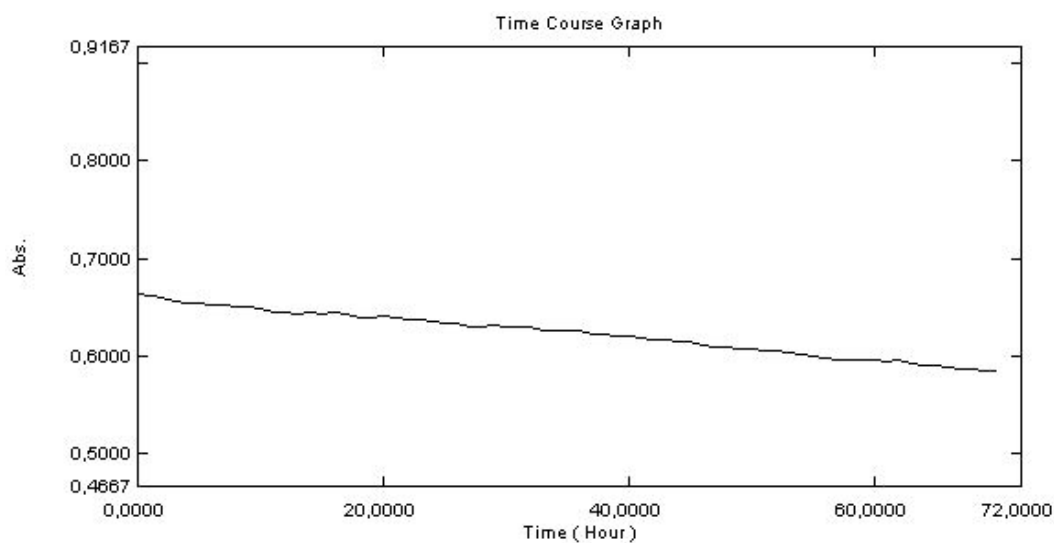


Figura 2 - Curva de absorvância do nanofluido para 280 nm

Verifica-se na Figura 2 uma diminuição da absorvância ao longo do tempo. Após 72h houve uma diminuição da absorvância de aproximadamente 12% e após 100h uma diminuição de 18% demonstrando uma tendência do nanofluido para estabilizar.

### 3.5 Caracterização das propriedades dos nanofluidos

A viscosidade dinâmica, a condutividade térmica e o calor específico são algumas das propriedades intrínsecas de cada fluido e que são de extrema importância para a análise dos mecanismos de transferência de calor por convecção que se pretende levar a efeito. Devido à inexistência, na literatura, de dados exactos para os nanofluidos com MWCNT's, foi necessário caracterizar experimentalmente o nanofluido, sendo que sempre que se relevou a impossibilidade de efectuar a caracterização experimental foram efectuadas aproximações matemáticas.

#### Medição da condutividade

A condutividade térmica indica a capacidade de um material conduzir calor, sendo de extrema importância para o cálculo do número de *Nusselt*.

A condutividade térmica foi medida experimentalmente recorrendo ao método do fio quente (THW), utilizando para isso um aparato experimental composto por um sensor KD2 Pro, um banho térmico para permitir o estudo da variação da condutividade térmica com a temperatura, e um frasco de dupla casca para colocar o fluido em análise.

A condutividade térmica do fluido base (água destilada) e do nanofluido 0.25% CNT/água destilada, foi medida a várias temperaturas (de 283.15 a 333.15 K, com intervalos de 10K).

Neste trabalho a condutividade térmica,  $K_p$  representa a condutividade térmica das partículas,  $K_{fb}$  a condutividade térmica do fluido base e  $K_{nf}$  a condutividade efectiva dos nanofluidos.

Os resultados obtidos para a condutividade térmica da água destilada e do nanofluido preparado estão representados na Figura 3. Na mesma figura é feita uma comparação com os valores para a água, encontrados na bibliografia (Incropera et al. (1998)).

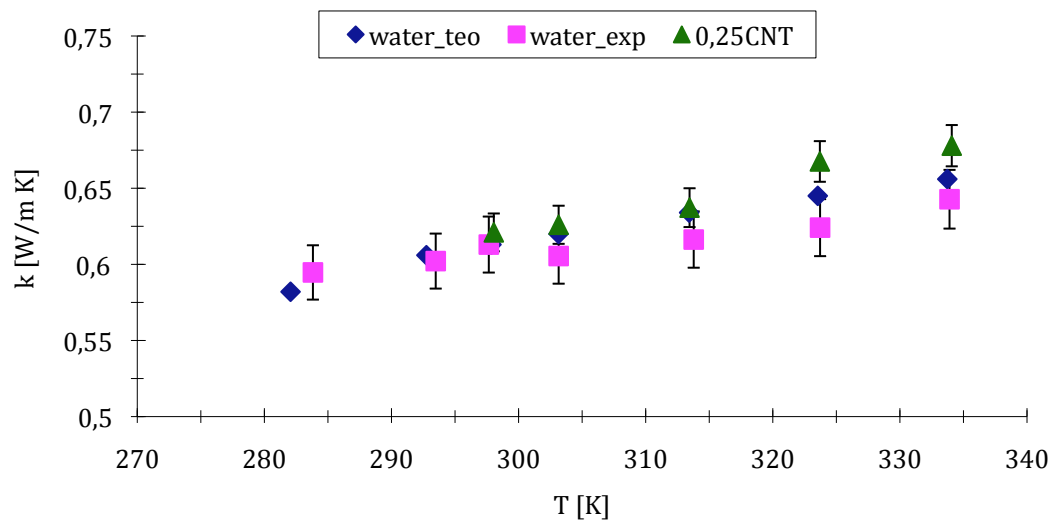


Figura 3 - Estudo comparativo da Condutividade térmica efectiva da água e de 0,25% CNT's/água

Pelo gráfico da Figura 3 é claramente visível que a condutividade térmica aumenta com o aumento da temperatura para todos os fluidos testados. De igual forma, é possível aferir um aumento da condutividade térmica para o nanofluido, quando comparado com o da água destilada, que se traduz num aumento de 7% para uma temperatura de 323K. Os valores experimentais para a água destilada apresentam um ligeiro desvio quando comparados com os valores da bibliografia para a água [adaptados de Incropera et al. (1998)], apresentando um erro máximo de  $\pm 3\%$ . Esta discrepância nos resultados pode dever-se a alguns factores experimentais, nomeadamente ao facto da água possuir uma viscosidade muito baixa e ser extremamente difícil estabilizá-la permitindo que esta seja sujeita a algumas vibrações induzidas pelo fluido do banho térmico, que pode afectar a aquisição de dados.

### Medição da viscosidade

A viscosidade é a propriedade que quantifica a resistência de um fluido ao escoamento ou seja, quanto maior for a viscosidade, menor será a velocidade com que o fluido se movimenta. No caso dos nanofluidos, a viscosidade é afectada por pequenas variações na concentração de nanopartículas ou através de variações na temperatura.

A viscosidade foi medida recorrendo a um reómetro de oscilação, para velocidades de corte de 0 a 600  $\text{sec}^{-1}$  e a uma temperatura de 318 K. Para a determinação da viscosidade foi considerada a velocidade de corte de 82  $\text{sec}^{-1}$ , que corresponde a uma viscosidade de  $1,35\text{E-}3 \text{ N.s/m}^2$ , (Jeyaraj (2009)).

Na Figura 4 está representado o gráfico da viscosidade em função da tensão de corte, para o nanofluido preparado, o valor escolhido para a viscosidade corresponde ao início da estabilidade.



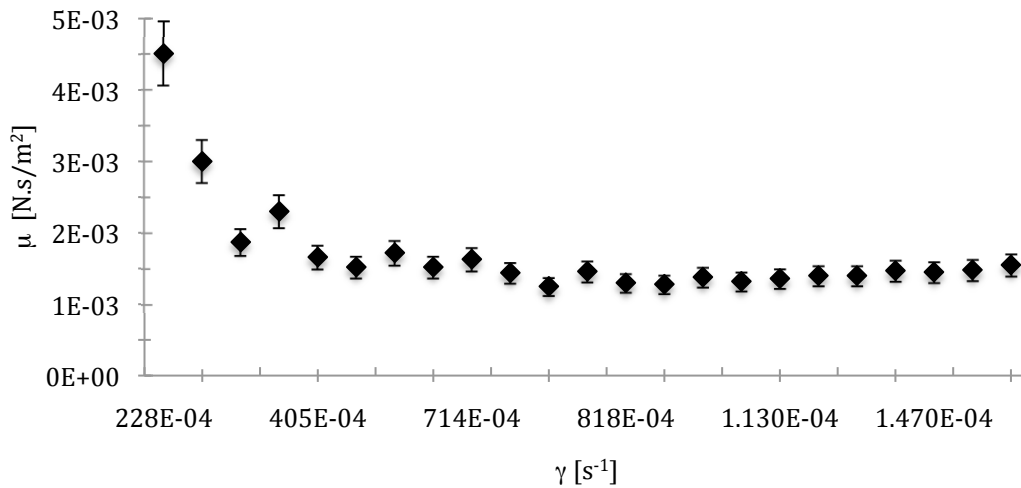


Figura 4 - Variação da viscosidade em relação à tensão de corte para o nanofluido 0,25 CNT's/água destilada

### Medição da Densidade

A densidade é outra propriedade de extrema importância para os cálculos experimentais. A densidade dos nanofluidos contendo partículas de MWCNT's pode ser medida recorrendo a um reómetro. Neste trabalho recorreu-se a correlações teóricas para calcular a densidade do nanofluido, Eq. 2. Esta, relaciona a fracção volúmica com a densidade das nanopartículas e do fluido base.

$$\rho_{nf} = \phi \cdot \rho_p + \phi \cdot \rho_{fb} \quad \text{Eq. 2}$$

### Medição do calor específico

O calor específico é uma grandeza que define a variação térmica de uma determinada substância ao receber uma determinada quantidade de calor. Devido à ausência de dados experimentais, foi necessário recorrer a uma correlação teórica, para a dedução desta propriedade, Eq. 3.

$$c_{p,nf} = \phi \cdot c_{p,p} + \phi \cdot c_{p,fb} \quad \text{Eq. 3}$$

Na tabela 8 é feito um resumo das propriedades descritas e que são necessárias à realização do trabalho experimental. Na ausência de dados experimentais para a água destilada, admitiram-se os valores da água saturada presentes nas tabelas de propriedades termofísicas dos líquidos saturados, (Incropera et al. (1998)), para a realização dos cálculos.

Tabela 8 - Resumo das propriedades termo-físicas dos fluidos a 300K

Propriedades		Fluidos		
		Água Saturada	Água Destilada	Água/0,25% CNT
Densidade ( $\rho$ )	[kg/m <sup>3</sup> ]	997	997	1197
Calor específico (Cp)	[J/kg K]	4179	4179	4384
Viscosidade ( $\mu$ )	[N s/m <sup>2</sup> ]	8,55E-4	8,55E-4	1,35E-3
Condutividade térmica (k)	[W/m K]	613E-3	605E-3	626E-3

## **Capítulo 4 - Projecto e desenvolvimento da bancada de transferência de calor**

### **Introdução**

Nesta secção serão descritos os componentes que constituem o aparato experimental (bancada de transferência de calor), seguindo-se uma explicação pormenorizada do funcionamento de cada componente e da experiência em geral. O projecto do aparato experimental pretende reunir os requisitos e processos necessários à realização deste trabalho.

Após um pré-dimensionamento do aparato experimental, nomeadamente no que concerne à área necessária à realização experimental para o presente trabalho e com vista à realização de experiências futuras, foi necessário dimensionar uma bancada capaz de incorporar todo o aparato experimental. De igual forma, foi decidido projectar uma secção dedicada ao manuseamento e armazenamento dos nanofluidos. Esta decisão recaiu na importância de controlar e minimizar todos os aspectos que possam contaminar ou degradar as amostras, bem como necessidade de um espaço próprio para o manuseamento de materiais de algum modo considerados menos seguros, constituindo a bancada um local que potencia a segurança do utilizador, bem como dos restantes utilizadores do laboratório, durante a preparação e caracterização dos nanofluidos.

### **4.1 Bancada experimental**

O dimensionamento da bancada experimental teve que ter em conta alguns factores, nomeadamente a multifuncionalidade, o facto de ter a capacidade de albergar múltiplas experiências, ter capacidade de implementação de um módulo fechado que permita ter uma atmosfera controlada (sistema a incorporar à posteriori) e deter alguma estanquicidade no caso de derrame de fluidos. Tendo em conta estes requisitos foram projectadas várias bancadas com recurso ao software de modelação em 3D CATIA®. As Figura 5 e 6 mostram as várias hipóteses consideradas durante a fase de projecto bem como a bancada final.



Figura 5 - Projectos desenvolvidos

A bancada final, Figura 6, é composta essencialmente por três secções independentes, uma secção experimental, uma de preparação e uma secção de armazenamento de material.

A secção experimental é composta por duas áreas distintas, uma para testes de fenómenos de transferência de calor por condução e outra para os fenómenos de transferência de calor por convecção. Esta última, apresenta como principais características a capacidade de albergar até duas experiências simultâneas para escoamentos horizontais, verticais ou diagonais, com um comprimento máximo de 1500 mm. Sendo toda a área experimental completamente isolada de modo a minimizar as perdas por convecção natural e reduzir a contaminação das amostras.

A secção de preparação apresenta como principais características a capacidade de preparação de amostras numa atmosfera isolada e controlada reduzindo a contaminação das amostras e possibilitando uma preparação mais controlada. Esta será revestida por janelas de acrílico com 8 mm de espessura e por placas de PVC expandido, estes materiais foram escolhidos devido as suas características de resistência química, fiabilidade, durabilidade e devido ao seu baixo custo. A secção de armazenamento tem em vista arrumar e organizar, num só espaço, materiais de laboratório.

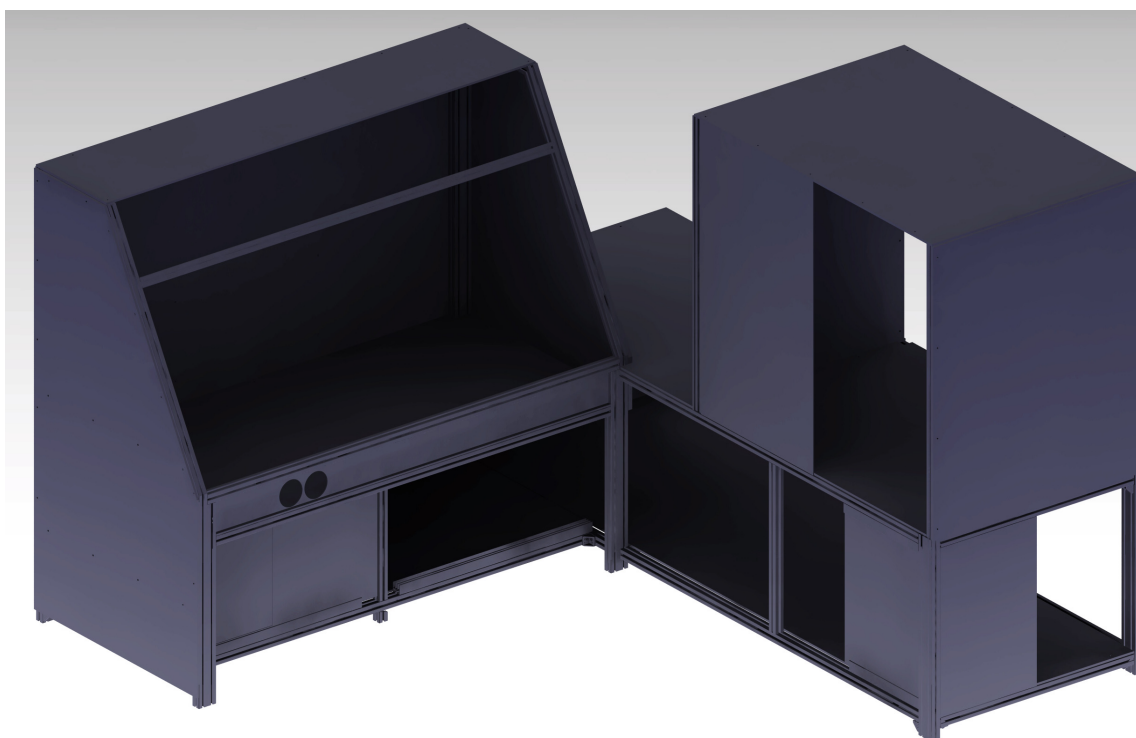


Figura 6 - Projecto final da bancada experimental

A bancada foi construída recorrendo a perfis de alumínio, devido às suas excelentes características mecânicas e químicas. Os tampo da bancada são constituídos por um aglomerado de partículas de madeira revestidos por uma folha de alumínio de modo a inferir impermeabilidade e resistência química. O isolamento foi conseguido recorrendo a placas de acrílico e PVC expandido.

A Figura 7 mostra uma fotografia da bancada após concluído o processo de construção.



Figura 7 – Aspecto da bancada final

## 4.2 Aparato experimental

O aparato experimental foi dimensionado e construído com o intuito de estudar a transferência de calor por convecção num tubo circular, com temperatura ou fluxo de calor constante à superfície para diferentes tipos de fluidos. O sistema é essencialmente composto por um reservatório, uma bomba peristáltica, tubos de silicone, uma zona de teste, uma zona de arrefecimento e um módulo de aquisição de dados para os registos de temperatura. Através da representação esquemática da Figura 8 é possível visualizar o circuito experimental.

O reservatório para os fluidos tem uma capacidade máxima de 1L e é fabricado em vidro transparente, de modo a ser possível monitorizar a dispersão e estabilidade dos nanofluidos.

A bomba peristáltica tem a referência DOSE IT P910 e foi adquirida à empresa “INTEGRA Biosciences AG”. Esta bomba permite bombear de uma forma controlada o escoamento dos fluidos através do sistema experimental. A particularidade deste tipo de bombas é o facto de bombear o fluido sem provocar quaisquer danos ou contaminação ao fluido, este factor deve-se à inexistência de contacto entre o fluido e as partes móveis da bomba, à excepção do interior das tubagens. Outra vantagem é a simplicidade deste sistema, devido à ausência de elementos ligantes como válvulas, selos ou vedantes apresentando custos de manutenção muito reduzidos. O caudal é controlado através de um painel digital o que permite uma boa precisão, apresentando um erro de 0,1ml/min e um caudal máximo de 5000ml/min ou 500 rpm, Figura 9.

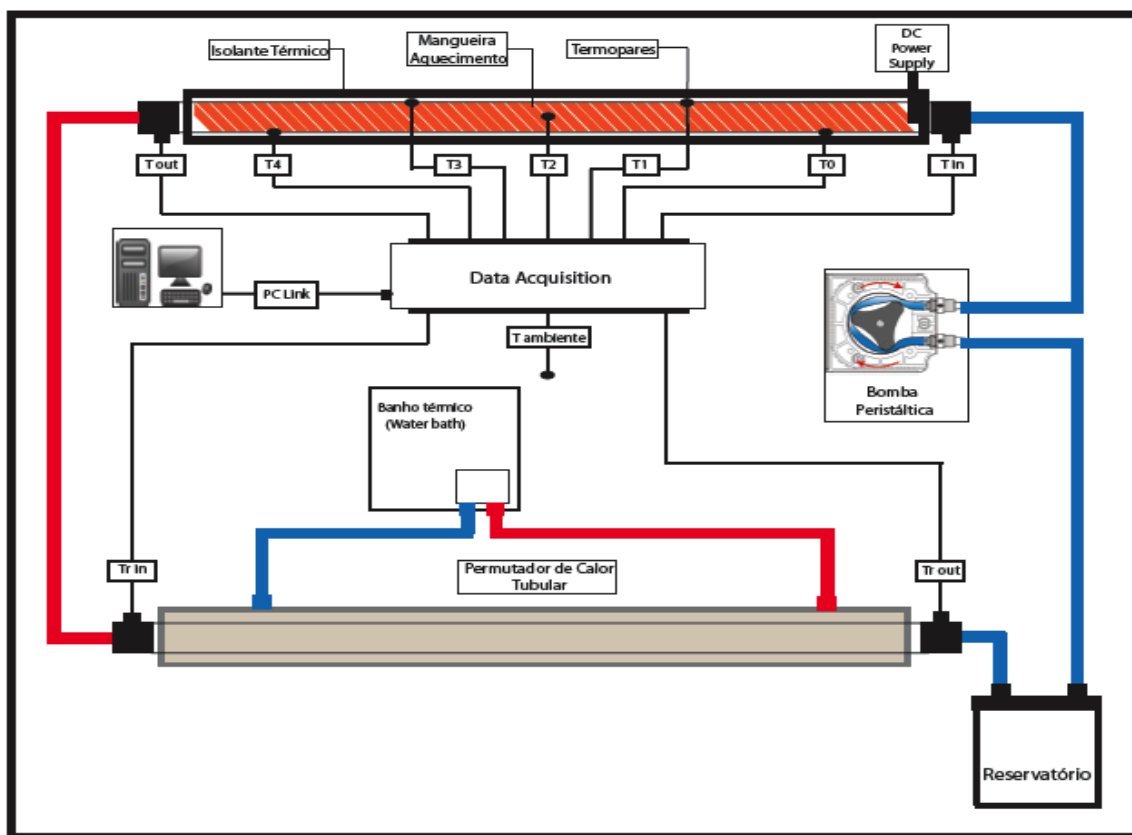


Figura 8 - Aparato experimental do sistema de transferência de calor por convecção

A zona de teste é composta pelos seguintes componentes: um tubo de aço inoxidável com 1200 mm de comprimento e com 6 e 8 mm de diâmetro interno e externo respectivamente. Um sistema de aquecimento fornecido pela Omega Engineering, Inc, que é composto por uma resistência elétrica revestida em silicone (*Silicone rubber heating tape*) com 432W de potência e controlada por um potenciômetro. Com o intuito de minimizar as perdas de calor por convecção natural, a mangueira de aquecimento foi envolta por uma fita de alumínio e posteriormente toda a zona de teste foi isolada recorrendo a um casquilho (tubo) de polietileno espumado. De modo a garantir um escoamento



plenamente desenvolvido à entrada do tubo, foi colocada uma secção de tubo mais pequena (110mm de comprimento), dimensionada de acordo com a expressão do comprimento hidrodinâmico de entrada para um regime laminar e turbulento, Eq. 4 e 5.

$$\left(\frac{x_d}{D}\right)_{lam} \approx 0,05 \cdot Re_D \quad \text{Eq. 4}$$

$$10 \leq \left(\frac{x_d}{D}\right)_{turb} \leq 60 \quad \text{Eq. 5}$$

A zona de arrefecimento é constituída por um permutador de calor de duplo tubo concêntrico e um banho térmico adquirido à VWR Internacional. O permutador de calor é composto por dois tubos concêntricos, um em aço inoxidável inserido num de PVC. O banho térmico tem uma capacidade de 2,2kW e permite operar numa gama de temperaturas dos 248 aos 423 K, utilizando como fluido operante o Kryo 30 o qual permite uma boa estabilidade e precisão termoestática. Este enche o tubo exterior através de uma entrada situada na parte inferior do permutador de calor, envolvendo o tubo interno e garantindo um arrefecimento constante ao longo do mesmo. Posteriormente, o fluido refrigerante volta ao banho térmico através de uma saída situada na parte superior do permutador de calor.



Figura 9 - Fotografia da bomba peristáltica DOSE IT

A aquisição dos dados é efectuada recorrendo a um módulo de aquisição de dados OMB-DAQ-2416 e a dez termopares do tipo K, fornecidos pela Omega Engineering, Inc.. Com o propósito de monitorizar a temperatura ao longo do tubo de teste foram colocados cinco termopares ( $T_{0 \rightarrow 4}$ ), espaçados de ( $\pm 200\text{mm}$ ) na superfície do tubo e em posições radiais distintas; um à entrada,  $T_{in}$  ( $x=0$ ), e ainda um outro à saída,  $T_{out}$  ( $x=1200$ ) do tubo de teste de modo a monitorizar as respectivas temperaturas do fluido. No permutador de calor foram igualmente instalado dois termopares, um à entrada e outro à saída de modo a registar o arrefecimento do fluido e a garantir uma temperatura



sempre constante no reservatório. Por fim, foi colocado um termopar para registar a temperatura ambiente e verificar a sua influência nos dados experimentais obtidos.

Na Figura 10 é apresentada uma fotografia do aparato experimental desenvolvido e construído para a caracterização de fluidos.

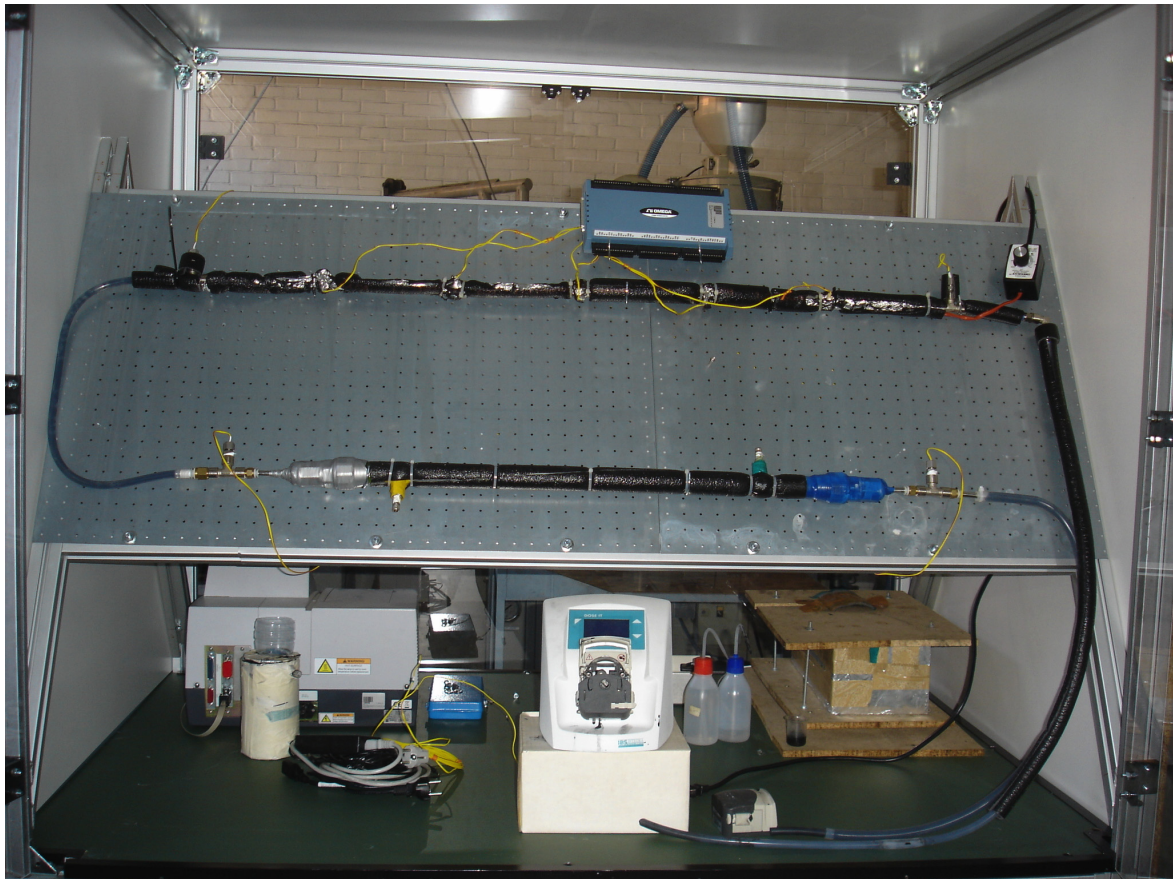


Figura 10 - Fotografia do aparato experimental

### 4.3 Metodologia

O modo de operação do aparato experimental é bastante simples: o fluido sob estudo sai do reservatório por acção da bomba peristáltica e é transportado através de tubos de silicone até à entrada da zona de teste. Neste ponto, é registada a temperatura de entrada do fluido. Seguidamente, o fluido escoa através do tubo de teste aquecido pela mangueria de aquecimento, sendo efectuada a leitura da temperatura de saída do fluido e da superfície ao longo do comprimento do tubo, que conclui

os processos nesta zona. Posteriormente, o fluido entra no permutador de calor, que arrefece o fluido ao longo do comprimento deste, as temperatura de entrada e saída são igualmente registadas. O ciclo termina com a entrada do fluido novamente no reservatório.

Para obter os valores experimentais, foi utilizado o seguinte método:

1. Calibração dos termopares através de software dedicado;
2. Certificação de que o reservatório se encontra limpo e inserção de cerca de 300ml de fluido no reservatório;
3. Ligar a bomba e realizar uma purga de modo a eliminar bolhas de ar que possam existir no sistema;
4. Inserir a velocidade desejada na bomba;
5. Ligar o banho térmico para uma temperatura de 278,2 K e ligar o aquecimento;
6. Aguardar cerca de 30 minutos de forma a garantir a estabilidade e homogeneidade do sistema.
7. Começar o registo de dados. Estes são registados em intervalos de 1 minuto e cada experiência tem a duração de 1 hora. Os dados só são validados após a repetição experimental de pelo menos cinco vezes.

Após o final da experiência e depois de retirar o fluido do sistema, efectua-se uma limpeza com água destilada e acetona por forma a remover o maior número de partículas indesejadas do sistema.

## 4.4 Calibração Experimental

A calibração experimental é um passo imprescindível na optimização de qualquer sistema, determinando a precisão e fiabilidade dos resultados obtidos. A calibração constitui uma optimização constante de um sistema e proporciona vantagens, tais como redução da variação nos resultados obtidos, prevenção de defeitos e compatibilidade das medições. Em termos práticos, a calibração visa assegurar a confiança de um instrumento ou sistema experimental, por meio de comparação do valor medido com um padrão deduzido pelo Sistema Internacional (SI).

### Formulação matemática

Por forma a validar o aparato experimental para o cálculo do coeficiente local de transferência de calor por convecção, foram efectuadas experiências utilizando como fluido operante a água destilada. A escolha deste fluido deve-se essencialmente ao facto do mesmo ter as suas propriedades termofísicas bem conhecidas. Com base nas medidas da temperatura da superfície do tubo, da temperatura de entrada e saída do fluido, fluxo de calor e caudal, foi determinado o respectivo coeficiente de transferência de calor por convecção. Posteriormente os valores obtidos foram comparados recorrendo às correlações teóricas seguintes:

**Taxa total de transferência de calor**

$$q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{f,out} - T_{f,in}) \quad [W] \quad \text{Eq. 6}$$

Onde  $\dot{m}$  é o caudal do fluido,  $c_p$  é o calor específico do fluido e  $T_{f,in}$  e  $T_{f,out}$  a temperatura de entrada e saída respectivamente.

**Fluxo de calor**

$$q'' = \frac{q}{A_{sup}} \quad [W / m^2] \quad \text{Eq. 7}$$

Em que  $A_{sup} = \pi \cdot D \cdot L [m^2]$  é a área da superfície de transferência de calor.

**Coefficiente de transferência de calor por convecção experimental**

$$h_{exp} = \frac{q''}{T_s(x) - T_m(x)} \quad [W / m^2 K] \quad \text{Eq. 8}$$

Onde  $T_s(x)$  é a temperatura da superfície ao longo da direcção axial e  $T_m(x)$  a temperatura média do fluido ao longo da direcção axial.

**Temperatura média do fluido ao longo da direcção axial**

$$T_m(x) = T_{m,in} + \frac{q'' \cdot P}{\dot{m} \cdot c_p} x \quad [K] \quad \text{Eq. 9}$$

**Número de Nusselt**

$$Nu_{exp} = \frac{h_{exp}(x) D_i}{k_f} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde  $D_i$  é o diâmetro interno e  $k_f$  é a condutividade térmica do fluido.

**Número de Nusselt teórico equação Shah**

$$Nu(x) = 1,953 \left( Re \cdot Pr \cdot \frac{D}{x} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Eq. 11}$$

**Número de Reynolds**

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D \cdot \mu} \quad \text{Eq. 12}$$

**Número de Prantl**

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad \text{Eq. 13}$$

As propriedades dos fluidos necessárias para o cálculo das correlações anteriores foram obtidas adoptando propriedades conhecidas dos fluidos e das nanopartículas, para a temperatura de entrada do fluido (ver Tabela 8).

Nos próximos parágrafos vai ser feita uma descrição dos processos de calibração efectuados para a realização deste trabalho experimental.

Previamente à conclusão da montagem experimental, todos os termopares foram calibrados recorrendo a uma célula de ponto fixo, TRCIII fornecida pela Ómega Engineering, Inc. A monitorização foi efectuada através do módulo e do software de aquisição de dados de modo a garantir a eliminação de qualquer erro induzido pelo hardware ou software. Os dados obtidos mostram um erro máximo de cerca de  $\pm 0,2$  K. Após esta calibração os termopares foram colocados nas devidas posições.

As primeiras experiências têm como principal objectivo verificar a estabilidade do sistema e dos sensores de temperatura. Com o aquecimento e o banho térmico desligados, foi ligada a bomba peristáltica e após o sistema estabilizar ( $\pm 30$ min), foram sendo adquiridas temperaturas da superfície do tudo para diferentes escoamentos. Na Tabela 9 estão apresentados os valores médios da temperatura de entrada e de saída, assim como o valor da média aritmética das temperaturas da superfície.

Tabela 9 - Temperaturas do aparato experimental para diferentes escoamentos

Regime	Nº Reynolds (Re)	T. entrada ( $T_{in}$ ) [K]	T. Saída ( $T_{out}$ ) [K]	T. Superfície ( $T_{sup}$ ) [K]	$\Delta T$ ( $T_{out} - T_{in}$ ) [K]
<b>Laminar</b>	824	296,1	296,1	296,7	0,0
	1100	298,8	299,1	299,4	0,3
	1470	297,7	297,6	298,1	-0,1
	1840	297,2	297,0	297,7	-0,2
<b>Turbulento</b>	3680	297,9	297,8	298,3	-0,1
	4600	295,9	296,0	297,3	0,1
	5510	298,6	298,8	299,4	0,2
	7350	299,0	299,3	299,4	0,3

Idealmente os valores obtidos para a variação de temperatura entre a entrada, a saída e a superfície idealmente seriam iguais a zero, uma vez que supostamente o sistema encontra-se estável e bem isolado. As discrepâncias obtidas podem dever-se a erros associados aos instrumentos de medida ou a pequenos vórtices criados pelo escoamento nos termopares influenciando as medidas registadas. O erro associado para esta calibração é inferior a 2%, o qual corresponde a uma variação média de cerca de  $\pm 0,2$  K, que se situa no intervalo correspondente ao erro dos instrumentos de medida.

Além deste processo de calibração foram realizadas outras experiências de modo a aumentar a confiança no aparato experimental. Uma vez que a superfície externa do tubo tem propriedades adiabáticas, a taxa à qual a energia é gerada no interior do tubo deve ser igual à taxa na qual ela é transferida por convecção ( $q''$ ) para o fluido. Através desta análise e desprezando a condução na parede do tubo, com o aquecimento ligado para uma potencia ( $q$ ) de 108W, efectuou-se o balanço de energia do sistema Eq. 14, tendo sido comparadas as variações de temperatura previstas com as experimentais.

$$\sum \dot{E}_{sistema} = q + q'' = 0 \quad \text{Eq. 14}$$

$$q = q''$$

$$\Delta T_{sistema} = \frac{q}{\dot{m}_f \cdot c_p}$$

$$\Delta T_{sistema} = \frac{108}{\dot{m}_f \cdot 4179}$$

Na Tabela 10 estão apresentados os valores teóricos e experimentais para a variação de temperatura.

Tabela 10 - Variação das temperaturas experimentais e teóricas para a água destilada

Nº Reynolds (Re)	Caudal ( $\dot{m}$ ) [kg/s]	Calor específico ( $c_p$ ) [J/kg.K]	$\Delta T$ Teórico ( $T_{Teo}$ ) [K]	$\Delta T$ Experimental ( $T_{Exp}$ ) [K]	$\Delta T$ ( $T_{Teo} - T_{Exp}$ ) [K]
824	0,0033	4179	281,2	289,4	8,2
1236	0,0050	4179	278,2	284,9	6,7
1650	0,0066	4179	277,2	277,0	0,2
2061	0,0083	4179	275,9	275,8	0,1
4122	0,0166	4179	274,9	274,8	0,1
5153	0,0207	4179	274,5	274,7	0,2
6183	0,0249	4179	274,3	274,4	0,1

A partir da análise da Tabela 10, pode-se concluir que, para números de Reynolds mais baixos existe uma elevada discrepância entre os valores experimentais e os teóricos (com  $\Delta T$  de 8,2 e 6,7 K). Após algumas tentativas para averiguar a origem de tal disparidade, chegou-se à conclusão que o problema estava a ser criado pela bomba peristáltica. Esta não tem a capacidade de debitar um caudal contínuo, permitindo que o fluido efectue várias passagens pelo mesmo sítio, em vez de uma só passagem, num movimento oscilatório. Esta limitação associada à incapacidade da bomba de debitar caudais em regime turbulento completamente desenvolvido ( $Re \approx 10^4$ ) para fluidos mais viscosos (ex. EG), restringe este trabalho ao estudo para escoamentos em regime laminar para números de Reynolds entre 1200 a 2100 e para nanofluidos com água destilada como fluido base. O erro máximo obtido através do balanço energético do sistema foi calculado como sendo cerca de 5% para os testes de calibração com água destilada. Kim et al. (2009) obtiveram valores semelhantes para o mesmo teste de calibração com água destilada.

A variação do número de *Nusselt* com o Reynolds e o coeficiente de transferência de calor com a posição axial, foi a última calibração efectuada ao aparato experimental. Mantendo uma temperatura de superfície constante e variando o caudal foram registadas as respectivas temperaturas. Os resultados obtidos foram comparados com as correlações de Shah, (Shah et al. (1987)) para fluidos de única fase ("single phase flowase") com comportamentos Newtonianos e estão apresentados na Figura 11.

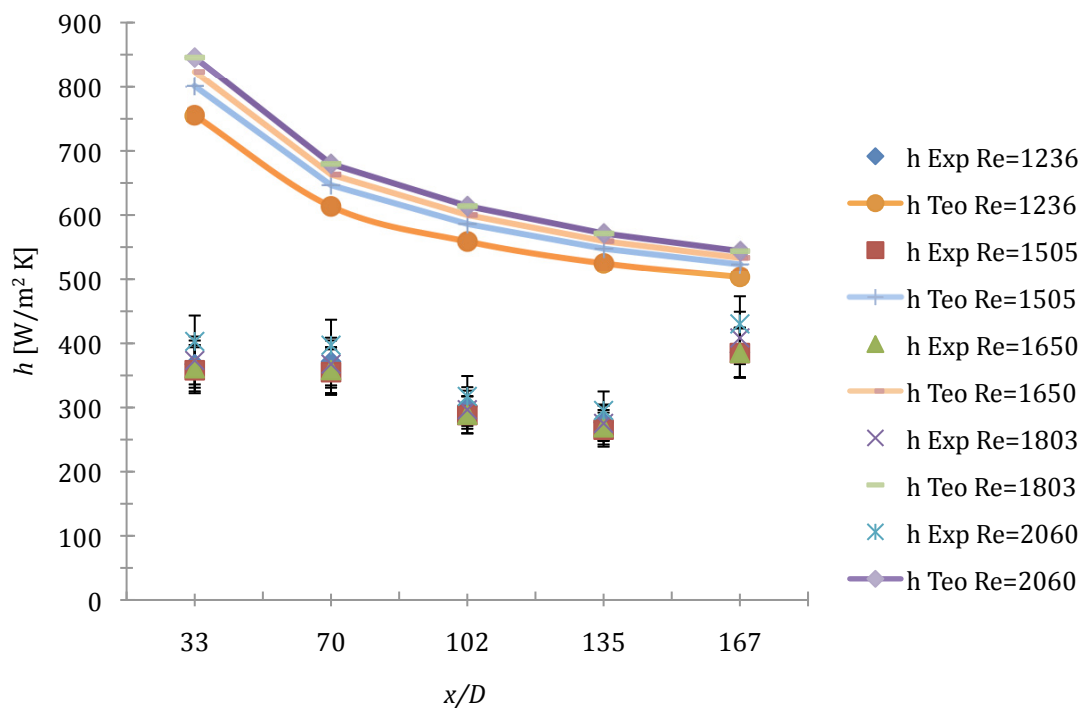


Figura 11 - Comparação entre os valores médios de  $h$  obtidos através de correlações empíricas para a água destilada e os valores obtidos experimentalmente, em função do comprimento do tubo.

Pela análise da Figura 11, pode-se concluir que os valores teóricos obtidos pela equação de Shah, não conseguem prever o comportamento do número de *Nusselt* em função do comprimento do tubo. O coeficiente de transferência de calor apresenta erros máximos de 46% e 27% para a zona de entrada e saída do tubo, respectivamente. No cálculo do número de *Nusselt*, os erros máximos foram de 46% e 28% para a entrada e saída do tubo, respectivamente. A diminuição do valor experimental do erro ao longo do tubo, pode dever-se ao desenvolvimento do comprimento da entrada térmico,  $x_D \approx 0,05 Re Pr D_i$  para o regime laminar, ou a diferenças nos diâmetros das tubagens utilizadas. Resultados semelhantes foram obtidos por Kim et al. (2009) e por Wen et al. (2004) para o mesmo número de *Nusselt*. Chegaram à conclusão que a divergência dos resultados obtidos relativamente às correlações de Shah se deve ao facto destas correlações terem sido deduzidas para tubagens com diâmetros elevados (superiores aos diâmetros utilizados nas montagens experimentais).

Na Figura 12 é feita uma comparação entre os resultados experimentais com os resultados da correlação de Shah (Eq. 11), da variação do número de *Nusselt* com o comprimento do tubo, para a água destilada.

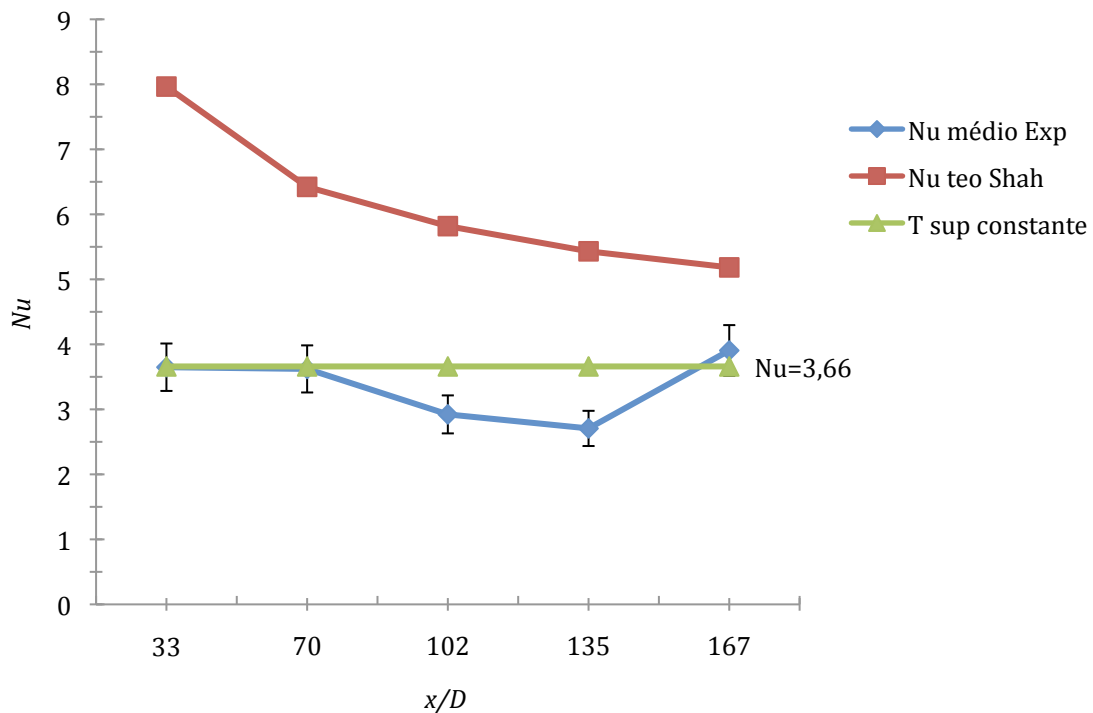


Figura 12 - Variação do número de *Nusselt* com o comprimento do tubo, para a água destilada. É feita a comparação entre os valores médios obtidos pelas correlações empíricas com os valores médios obtidos experimentalmente.

Ao terem sido consideradas condições completamente desenvolvidas para uma temperatura de superfície constante, o número de *Nusselt* deixa de ser descrito por uma expressão analítica, tendendo para uma constante de  $Nu=3,66$ . Este valor é independente do número de Reynolds e do número de Prantl para um regime laminar, estando representada na Figura 12 por “T sup constante”. No entanto esta condição só é válida caso exista um comprimento de tubo inicial não aquecido (Kays et al. (2004)). Respeitando as condições referidas, os resultados experimentais para o número de *Nusselt* estão apresentados na Figura 12. A temperatura de parede considerada foi deduzida da média de todos os valores dos termopares da superfície. Os valores obtidos são aproximadamente constantes estando em concordância com as condições anteriores. Os valores médios experimentais apresentam um erro inferior a 2% e 8% para a região de entrada e saída do tubo, respectivamente. Resultados semelhantes foram obtidos por (Kim et al. (2009)).

Tendo em conta todo o procedimento descrito e os resultados experimentais obtidos, pode-se concluir que o aparato experimental está bem calibrado.



### **Repetibilidade**

Após calibração do sistema é necessário averiguar a repetibilidade dos resultados experimentais obtidos no aparato experimental. A repetibilidade é um factor indispensável à garantia de fiabilidade dos resultados experimentais. O termo repetibilidade da medida significa a aproximação entre os diferentes resultados de medições sucessivas de uma mesma grandeza, efectuadas nas mesmas condições, sendo um indicador da estabilidade das medidas, ou seja, quanto menor é a dispersão dos valores experimentais obtidos em torno do seu valor médio, maior é a repetibilidade da medida ou mais preciso o aparelho de medida.

Na Figura 13, apresentam-se resultados que visam estabelecer a repetibilidade do aparato experimental para a água destilada e para  $Re=1650$  (regime laminar). Todos os ensaios foram realizados em dias diferentes, de modo a aumentar a confiança na repetibilidade dos resultados. Os restantes resultados da repetibilidade encontram-se nas Figura 22 a 27 do Anexo 2.

### **Regime Laminar**

Os resultados obtidos, e que estão apresentados na Figura 13, demonstram uma melhor repetibilidade com o aumento do número de Reynolds (Figura 22 a 24, do Anexo 2). Comparativamente com os valores médios, o erro médio mínimo obtido para o regime laminar ( $Re=1650$ ) é inferior a 7%, atingindo um máximo de 15% para um  $Re=1236$  para a região de entrada do tubo. O desvio padrão máximo registado durante as medições experimentais foi de 0,4 K. Isto, pode dever-se a alguns problemas causados pela bomba peristáltica ou devido ao escoamento não se encontrar completamente desenvolvido. Estes factores são minimizados à medida que a velocidade do escoamento aumenta.

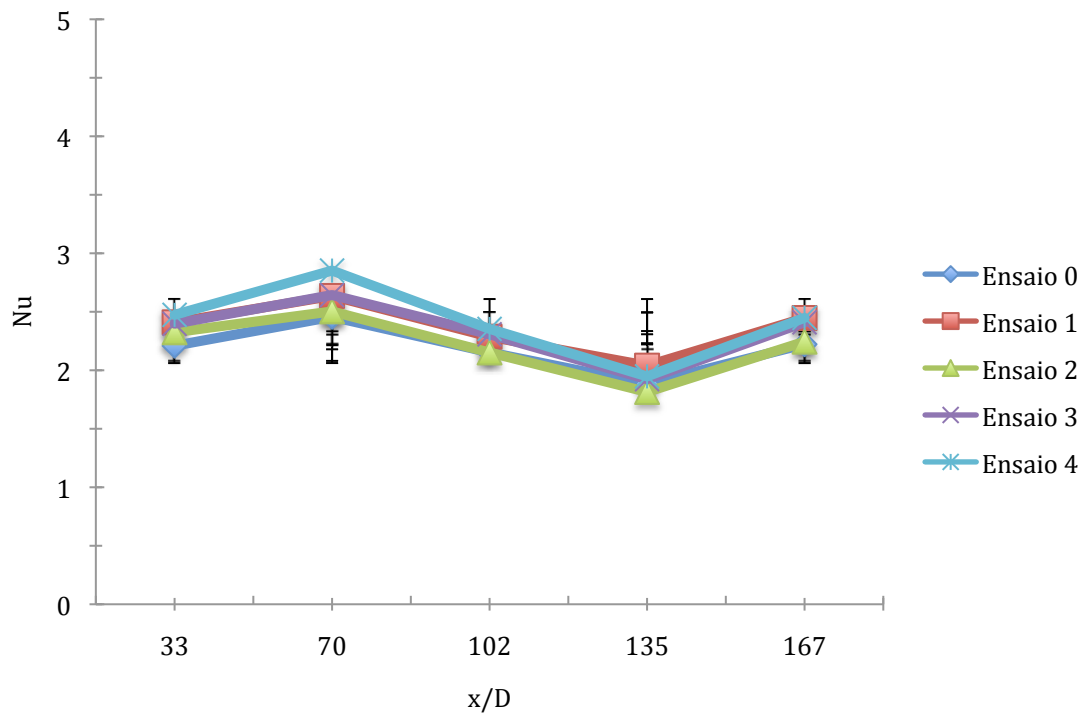


Figura 13 - Variação do número de *Nusselt* em função da posição axial do tubo, para a água destilada e para  $Re=1650$

### Regime turbulento

Analogamente aos resultados obtidos para o regime laminar, à medida que a velocidade de escoamento aumenta, a repetibilidade dos resultados também aumenta. Comparativamente com os valores médios, pode-se afirmar que, para o regime turbulento o aparato experimental apresenta uma boa repetibilidade, apresentando discordâncias médias máximas de 10,4% para  $Re=4122$  e mínimas de 5,2% para um  $Re=6183$  na zona da entrada do tubo. Na Figura 14 mostram-se os resultados obtidos para  $Re=6183$ . Os restantes resultados para os distintos escoamentos encontram-se nas Figuras 25 a 27, Anexo 2.

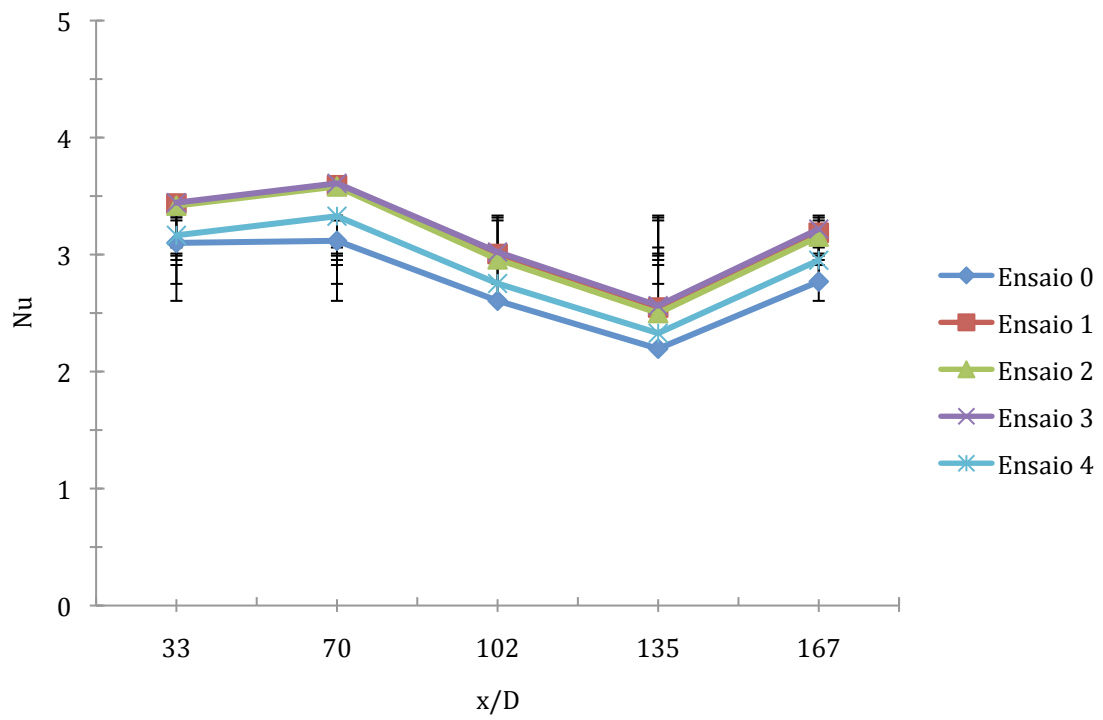


Figura 14 - Variação do número de *Nusselt* em função da posição axial do tubo, para a água destilada e  $Re=6183$



## **Capítulo 5 - Análise dos mecanismos de transferência de calor por convecção em nanofluidos**

### **5.1 Valores médios da temperatura da parede**

Com a potência da mangueira de aquecimento fixa a 108W, foi feito um estudo da variação das temperaturas da superfície do tubo para os diferentes escoamentos e fluidos. Esta experiência tem o propósito de permitir averiguar a variação da temperatura da parede com a variação do número de Reynolds, para os diferentes fluidos em análise.

A variação da temperatura da superfície do tubo em função da posição axial, para diferentes escoamentos e fluidos, está apresentada na Figura 15. É possível verificar que, com o aumento do caudal assiste-se a uma diminuição da temperatura da parede, como era esperado, uma vez que o coeficiente de transferência de calor é proporcional ao aumento do número de Reynolds, i.e., quanto maior for o coeficiente de transferência de calor, maior será a capacidade do fluido em receber calor e consequentemente menores serão as temperaturas da superfície do tubo. Inexplicavelmente, para o último termopar (colocado na saída do tubo) registou-se uma diminuição da temperatura, isto pode ter sido causado por uma colocação imprópria do termopar na superfície do tubo; por perdas de calor do sistema experimental; ou devido ao facto deste estar colocado na zona limite do comprimento de entrada térmico. Verificou-se igualmente, que, com a adição das nanopartículas (neste caso os CNT's), a temperatura da parede diminuiu bastante para as mesmas condições, o que evidencia um aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção, para o nanofluido estudado (0.25% CNT/água destilada).

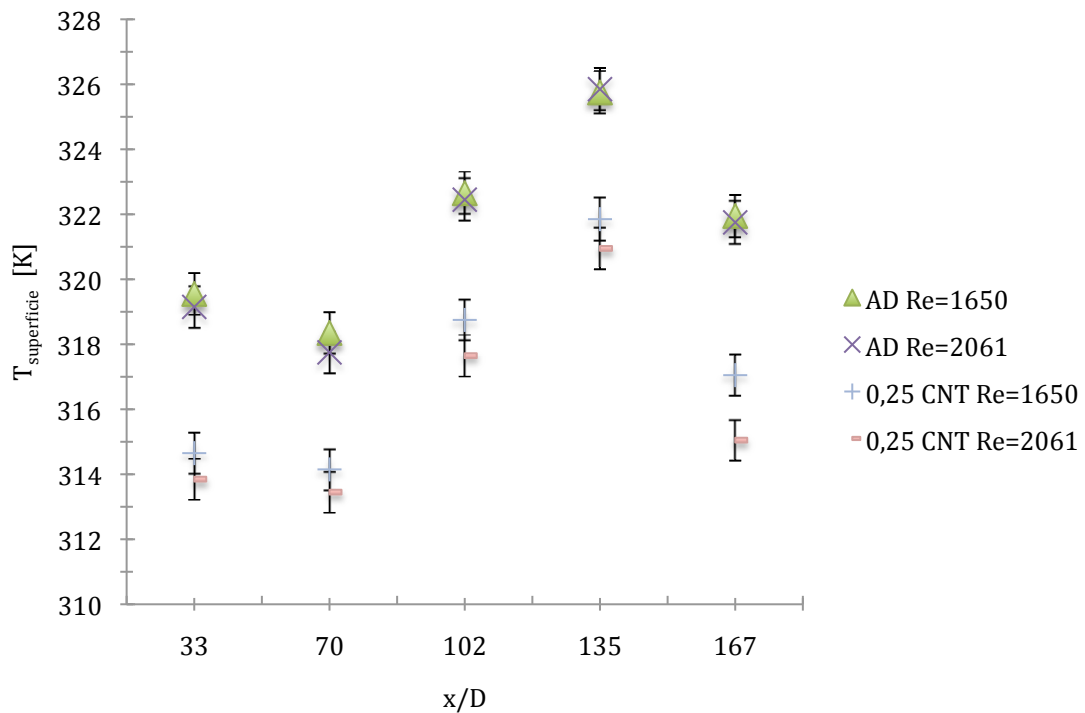


Figura 15 - Variação da temperatura da superfície do tubo em função da posição axial, para diferentes escoamentos. Comparação entre a água destilada e o nanofluido.

## 5.2 Comparação dos valores teóricos e experimentais em posições axiais distintas

### Água destilada

Considerando individualmente cada uma das posições axiais do tubo,  $x/D=33$  e  $x/D=167$ , em função do número de Reynolds, apresentados nas Figura 16 e 17, é possível verificar uma aproximação dos valores experimentais aos valores obtidos pela correlação de *Shah*, para a região final do tubo ( $x/D \geq 135$ ), apresentando um erro inferior a 45%. Ao compararem-se com as condições de um escoamento completamente desenvolvido para uma temperatura de superfície constante, o erro apresentado pelo aparato experimental é inferior a 2% para  $x/D=33$  e 7% para  $x/D=167$ .

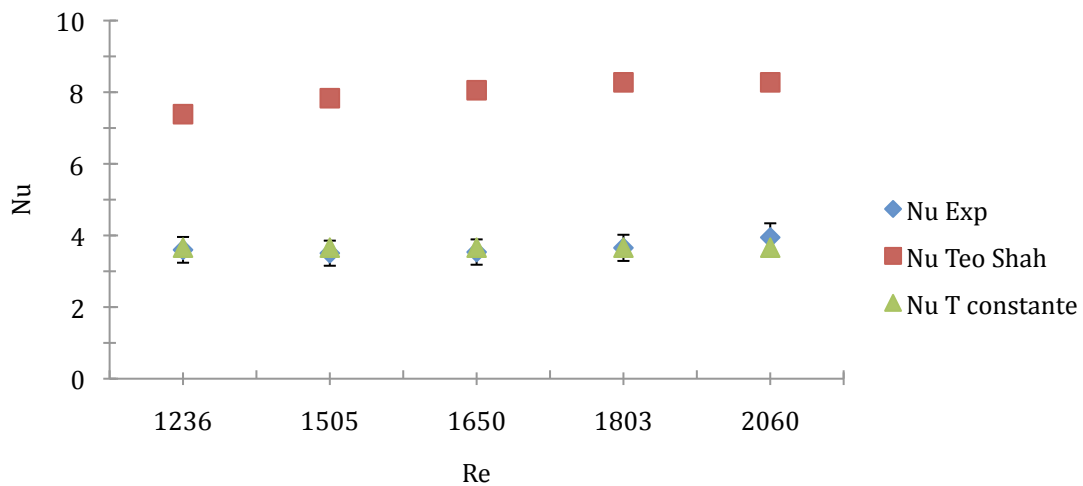


Figura 16 - Comparação entre valores os experimentais e teóricos do número de *Nusselt* para a água destilada, para a posição axial  $x/D=33$

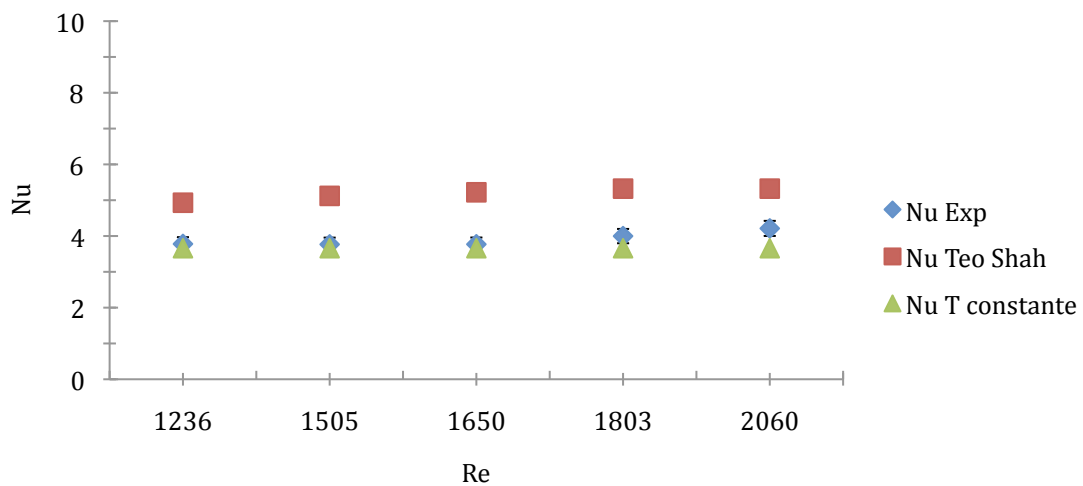


Figura 17 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de *Nusselt* para a água destilada, para a posição axial  $x/D=167$

#### Nanofluido 0,25% CNT's/água destilada

Nas Figura 18 e 19 são feitas comparações entre os valores experimentais e teóricos da variação do número de *Nusselt* com o número de Reynolds, para o nanofluido estudado, e para as posições axiais  $x/D=33$  e  $x/D=167$ , respectivamente. Ao analisar os gráficos das Figura 18 e 19 é possível concluir que o número de *Nusselt* para o nanofluido, 0,25% CNT/água destilada, aumenta proporcionalmente com o número de Reynolds, à excepção de  $Re=1236$ . Este facto pode dever-se ao

escoamento do nanofluido não estar completamente desenvolvido, tanto a nível hidrodinâmico como a nível térmico. Este comportamento pode, igualmente dever-se aos problemas provocados pela bomba peristáltica.

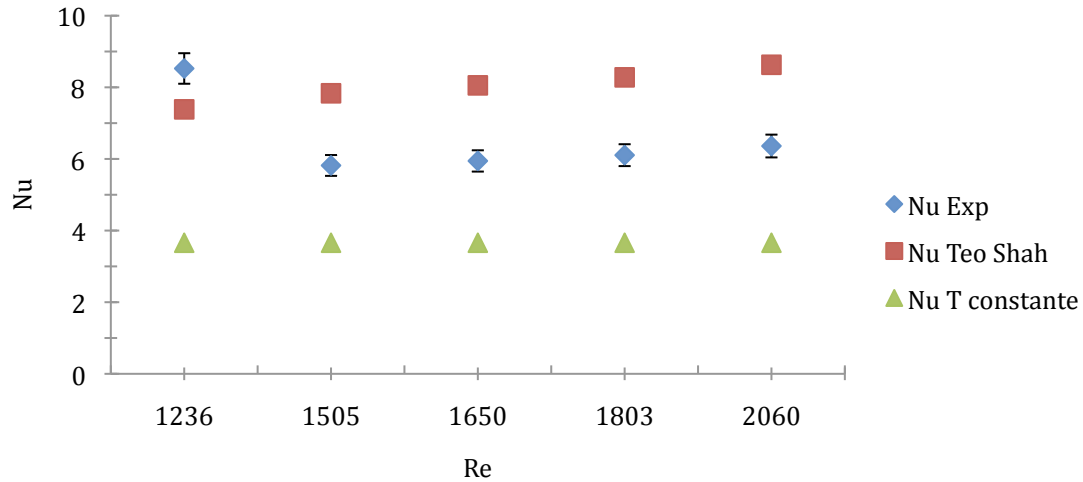


Figura 18 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de *Nusselt* para o nanofluido 0,25% CNT's/água, para a posição axial  $x/D=33$

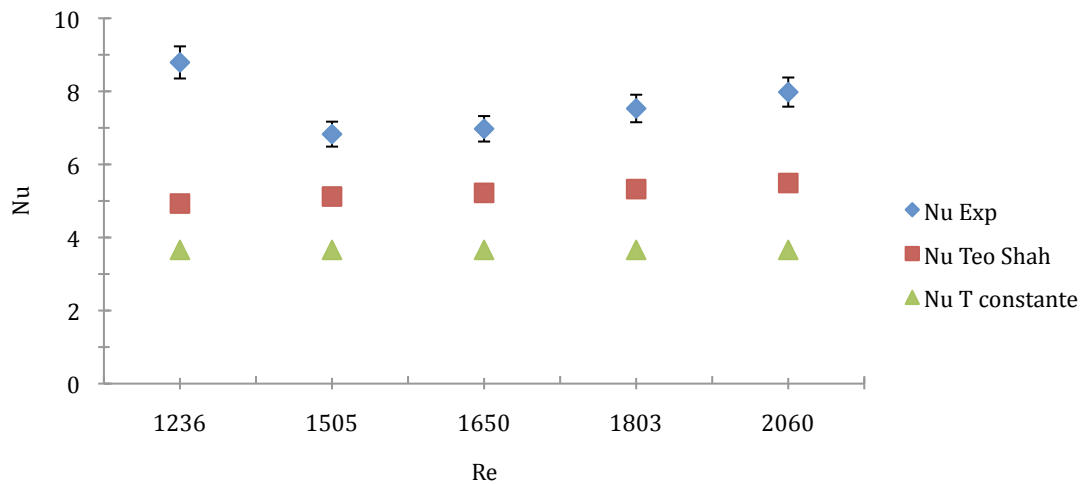


Figura 19 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de *Nusselt* para o nanofluido 0,25% CNT's/água, para a posição axial  $x/D=167$

Outra conclusão importante que se pode tirar destes resultados é que, de um modo geral as correlações de Shah não conseguem descrever o comportamento do nanofluido, com excepção para a posição do tubo  $x/D=70$ . Com base nesta última conclusão e desprezando os valores obtidos para um



$Re=1236$ , pode-se afirmar que o aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção atinge o seu valor máximo para a posição axial de  $x/D=167$  e para um Reynolds de 2060.

### 5.3 Coeficiente de transferência de calor por convecção da água destilada e do Nanofluido: comparação

Os efeitos da variação do número de Reynolds no coeficiente de transferência de calor por convecção do nanofluido ao longo das posições axiais, estão ilustrados no gráfico da Figura 20. No mesmo gráfico é feita uma comparação entre os valores experimentais obtidos para a água destilada (AD) e para o Nanofluido (NF). Da análise do gráfico da Figura 20, pode-se verificar que a presença das nanopartículas (CNTs) no nanofluido aumentam significativamente o coeficiente de transferência de calor por convecção, sendo que para as regiões de entrada e de saída do tubo os valores experimentais são consideravelmente superiores, quando comparados com os valores da água destilada. Verifica-se, igualmente que à medida que o número de Reynolds aumenta, a variação do coeficiente de transferência de calor diminui, aproximando-se de um valor constante.

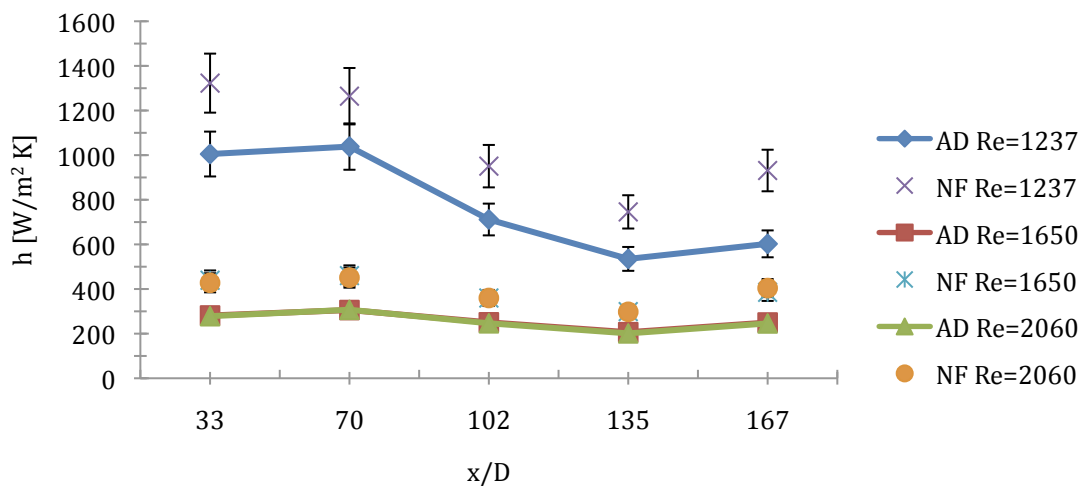


Figura 20 - Comparação entre os valores experimentais da água destilada e do nanofluido 0,25CNT's/água, para diferentes escoamentos

Na Figura 21 está representada a variação do aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção (do nanofluido em relação à água destilada) em função da posição axial ao longo do tubo, para diferentes escoamentos. A análise ao gráfico da Figura 21 permite concluir que, a presença dos CNTs aumenta consideravelmente o coeficiente de transferência de calor de convecção do fluido base (água destilada); a transferência de calor por convecção varia ao longo da posição axial do tubo,

apresentando um valor máximo para a entrada, diminuindo ao longo do mesmo, sendo que se verifica um ligeiro aumento da eficiência de remoção de calor por convecção na posição final do tubo. Este comportamento é recorrente para todos os testes; o maior aumento do coeficiente de transferência de calor ocorreu para a posição inicial do tubo e para um número de Reynolds de 2060, tendo sido verificado um aumento 105% em relação ao registado para a água destilada; o coeficiente de transferência de calor por convecção, varia consoante a velocidade de escoamento e ao longo do tubo de teste.

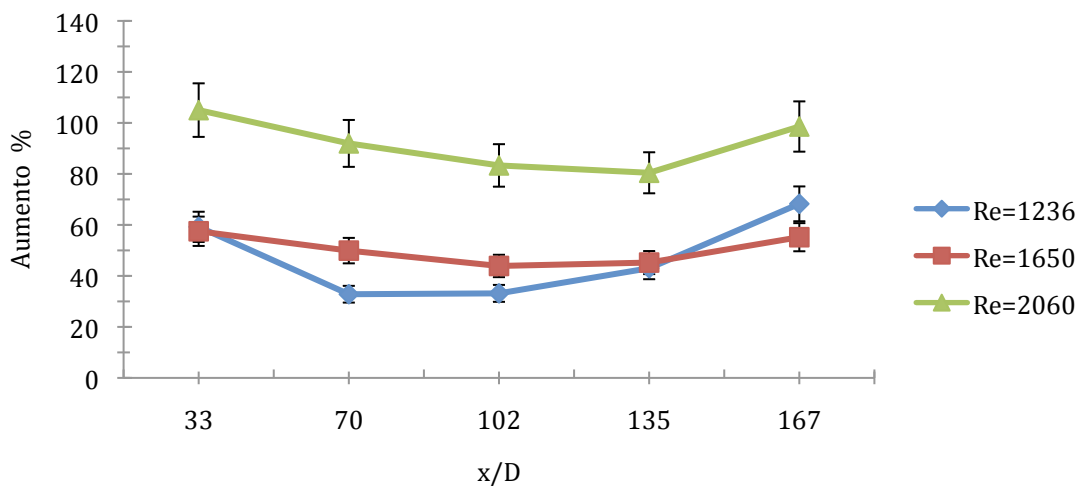


Figura 21 - Variação do aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção, do nanofluido em relação à água destilada com a posição axial do tubo, para diferentes escoamentos.

Comparando os resultados da condutividade térmica da Figura 3 com os resultados da Figura 21, pode-se verificar que o aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção é mais significativo quando comparado com o aumento da condutividade térmica do nanofluido, face à água destilada (3,4%). Resultados semelhantes mas menos prenunciados foram obtidos por Xuan et al. (2003) que, para o regime turbulento, mostraram que o coeficiente de transferência de calor por convecção, aumentava cerca de 60% para um nanofluido de 2 vol % de nanopartículas de Cu em água. Contudo, verificaram apenas um aumento de 12.5% para a condutividade térmica do nanofluido em relação à água. Wen et al. (2004) investigaram a transferência de calor em nanofluidos aquosos contendo nanopartículas de alumina. Os resultados obtidos mostraram um aumento de 47% para o coeficiente de convecção, na posição axial  $x/D=60$ , para uma concentração de 1,6 vol % e para um  $Re=1600$ , enquanto que o aumento da condutividade foi apenas de 10%. Ding et al. (2006), fizeram estudos a um nanofluido contendo CNT's e água e obtiveram um aumento máximo de 350% para um  $Re=800$  e para uma posição axial de  $x/D=110$ . Contudo nenhum dos investigadores foi capaz de explicar a razão de tal aumento, enumerando possíveis razões tais como, o alinhamento das partículas,

a redução da espessura da camada limite térmica, o elevado rácio do factor de forma e/ou o movimento Browniano das partículas.



## Capítulo 6 - Conclusões e trabalhos futuros

Os fluidos normalmente utilizados para a permuta de calor em sistemas energéticos apresentam sérias limitações do ponto de vista essencialmente termofísico que comprometem a eficiência energética dos mesmos sistemas. A adição de nanopartículas, tais como nanotubos de carbono permite melhorar as propriedades termofísicas dos fluidos base e, dessa forma, aumentar o seu desempenho em sistemas energéticos.

Com o objectivo de estudar e comprovar a melhoria das propriedades termofísicas de um nanofluido (0.25% CNT/água destilada) e estabelecer a comparação relativamente ao fluido base (água destilada), foi desenvolvida e construída uma bancada experimental para aferir os mecanismos de transferência de calor para um qualquer sistema de permuta de calor. A bancada experimental foi calibrada tendo-se aferido a repetibilidade dos resultados, para as diferentes condições de escoamentos analisadas (laminar e turbulento). Verificou-se uma maior repetibilidade com o aumento do número de Reynolds, tendo sido obtido um erro médio máximo de 15% para o regime laminar e de 5% para o regime turbulento. Face a estes resultados, pode-se assegurar que o aparato experimental se encontra calibrado permitindo obter dados fiáveis. Com o sistema dimensionado e calibrado, foi efectuado o estudo com o intuito de analisar o mecanismo de transferência de calor através da avaliação do coeficiente de transferência de calor por convecção para o nanofluido com 0.25 % vol. CNT no fluido base água destilada, sendo feitos estudos comparativos para a água destilada. O fluido escoou através de um tubo aquecido com 6 mm de diâmetro interno e com uma temperatura de superfície média constante, para diferentes regimes (números de Reynolds diferentes). Para aferir as propriedades de transferência de calor por convecção, foi necessário caracterizar o nanofluido (0.25% CNT/água destilada) quanto à sua condutividade térmica, viscosidade e calor específico. Verificou-se um aumento da condutividade térmica do nanofluido, face ao fluido base, de cerca de 3.4%, para uma temperatura de 300K.

Verificou-se um aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção de cerca de 105%, para o nanofluido (0.25% CNT/água destilada), quando comparado com o da água destilada, para as mesmas condições experimentais. Conclui-se igualmente que à medida que o número de Reynolds aumenta, a variação do coeficiente de transferência de calor diminui, aproximando-se de um valor constante.

Comparando o aumento da condutividade térmica (~3.4%) com o do coeficiente de transferência de calor com convecção (105%), do nanofluido face à água destilada, o segundo apresenta um valor consideravelmente superior. Estes resultados são semelhantes aos encontrados na bibliografia, existindo um grande debate sobre os possíveis mecanismos de transferência de calor que ocorrem nos nanofluidos. A principal razão apontada é o movimento Browniano das partículas que

poderá influenciar na dispersão destas no fluído base, alterando desta forma a condutividade térmica, a viscosidade, entre outras.

Os resultados obtidos neste trabalho são encorajadores para a continuação do estudo de nanofluidos com nanotubos de carbono de diferentes tipos (SWNT, MWNT, DWNT), com diâmetros e comprimentos diferentes, assim como outras concentrações volumétricas), existindo a real possibilidade de estes serem utilizados como fluidos refrigerantes avançados tanto na área de engenharia térmica, como noutras áreas industriais.

---

## Bibliografia

- Akoh, H., et al. (1978). "Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate." Journal of Crystal Growth **45**: 495-500.
- Assael, M. J., et al. (2004). "Thermal Conductivity of Suspensions of Carbon Nanotubes in Water." International Journal of Thermophysics **25**(4): 971-985.
- Biercuk, et al. (2002). Carbon nanotube composites for thermal management. Melville, NY, ETATS-UNIS, American Institute of Physics.
- Buongiorno, J. (2006). "Convective Transport in Nanofluids." Journal of Heat Transfer **128**(3): 240-250.
- Chen, H., et al. (2009). "Rheological behaviour of ethylene glycol-titanate nanotube nanofluids." Journal of Nanoparticle Research **11**(6): 1513-1520.
- Choi et al. (2001). "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions." Applied Physics Letters **79**(14): 2252.
- Choi, E. S., et al. (2003). "Enhancement of thermal and electrical properties of carbon nanotube polymer composites by magnetic field processing." Journal of Applied Physics **94**(9): 6034-6039.
- Choi, S. U. S. (1998). Nanofluid Technology: Current status and future Research. Second Korean-American Scientists and Engineers Association Research. Vienna, VA.
- Choi, S. U. S. J. A. Eastman (1995). "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with nanoparticles."
- Czarnetzki, W. W. Roetzel (1995). "Temperature oscillation techniques for simultaneous measurement of thermal diffusivity and conductivity." International Journal of Thermophysics **16**(2): 413-422.
- Das, S., et al. (2003). "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids." Journal of Heat Transfer **125**(4): 567-574.
- Das, S. K., et al. (2006). "Heat Transfer in Nanofluids, A Review." Heat Transfer Engineering **27**(10): 3 - 19.
- Das, S. K., et al. (2003). "Pool boiling characteristics of nano-fluids." International Journal of Heat and Mass Transfer **46**(5): 851-862.
- Ding, Y., et al. (2006). "Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids)." International Journal of Heat and Mass Transfer **49**(1-2): 240-250.
- Eastman et al. (2001). "Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles." Applied Physics Letters **78**(6): 718.
- Eastman, J. A. (1999). Novel thermal properties of nanostructured materials.
- Eastman, J. A., et al. (1996). Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids.
- Esumi, K., et al. (1996). "Chemical treatment of carbon nanotubes." Carbon **34**(2): 279-281.
- Godson, L., et al. (2010). "Enhancement of heat transfer using nanofluids--An overview." Renewable and Sustainable Energy Reviews **14**(2): 629-641.

- Hong, T.-K., et al. (2005). "Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids." Journal of Applied Physics **97**(6): 064311-064314.
- Hwang, K. S., et al. (2009). "Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids in fully developed laminar flow regime." International Journal of Heat and Mass Transfer **52**(1-2): 193-199.
- Hwang, Y., et al. (2007). "Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids." Thermochimica Acta **455**(1-2): 70-74.
- Iijima, S. (1991). "Helical microtubules of graphitic carbon." Nature **354**(6348): 56-58.
- Incropera, F. P. D. P. De Witt (1998). Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.
- Jeyaraj, P. (2009). Water based nanofluids development and characterization. Departement of Mechanical Engineering Aveiro, University of Aveiro.
- Kays, W. M. M. E. Crawford (2004). "Convective heat and mass transfer (4th Ed)."
- Kebllinski, P., et al. (2002). "Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)." International Journal of Heat and Mass Transfer **45**(4): 855-863.
- Kim, D., et al. (2009). "Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions." Current Applied Physics **9**(2, Supplement 1): e119-e123.
- Lamas, B. C., et al. (2010). "EG/CNTs nanofluids engineering and thermo-rheological characterization."
- Li, Q. Y. Xuan (2002). "Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid." Science in China Series E: Technological Sciences **45**(4): 408-416.
- Li, X., et al. (2007). "Evaluation on dispersion behavior of the aqueous copper nano-suspensions." Journal of Colloid and Interface Science **310**(2): 456-463.
- Li, Y., et al. (2009). "A review on development of nanofluid preparation and characterization." Powder Technology **196**(2): 89-101.
- Liu, M.-S., et al. (2005). "Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids." International Communications in Heat and Mass Transfer **32**(9): 1202-1210.
- Liu, M.-S., et al. (2006). "Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method." International Journal of Heat and Mass Transfer **49**(17-18): 3028-3033.
- Lo, C.-H., et al. (2005). "Shape-controlled synthesis of Cu-based nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS)." Journal of Crystal Growth **277**(1-4): 636-642.
- Maiga, S. E. B., et al. (2004). "Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube." Superlattices and Microstructures **35**(3-6): 543-557.
- Maiga, S. E. B., et al. (2005). "Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows." International Journal of Heat and Fluid Flow **26**(4): 530-546.
- Maxwell, J. C., Ed. (1881). A treatise on Electricity and Magnetism. Oxford, U.K., Clarendon Press.
- Murshed, S. M. S., et al. (2005). "Enhanced thermal conductivity of TiO<sub>2</sub>-water based nanofluids." International Journal of Thermal Sciences **44**(4): 367-373.
- Pak, B. C. Y. I. Cho (1998). "HYDRODYNAMIC AND HEAT TRANSFER STUDY OF DISPERSED FLUIDS WITH SUBMICRON METALLIC OXIDE PARTICLES." Experimental Heat Transfer **11**(2): 151 - 170.



- Patel, H. E., et al. (2003). "Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects." Applied Physics Letters **83**(14): 2931-2933.
- Peng, X. X. Yu (2007). "influence factors on suspensions stability of nanofluids." Eng. Sci **41**: 577-580.
- Peterson, G. P. C. H. Li (2006). Heat and Mass Transfer in Fluids with Nanoparticle Suspensions. Advances in Heat Transfer. J. P. H. A. B.-C. George A. Greene I. C. Young, Elsevier. **Volume 39**: 257-376.
- Ponmozhi, J., et al. (2010). "Thermodynamic and Transport Properties of CNT- Water Based Nanofluids." Journal of Nano Research **11**.
- Prasher, R., et al. (2006). "Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications." Applied Physics Letters **89**(13): 133108-133103.
- Putnam, S. A., et al. (2006). "Thermal conductivity of nanoparticle suspensions." Journal of Applied Physics **99**(8): 084308-084306.
- Shah, R. K. W. Aung (1987). Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer. New York, Wiley.
- Wang, X.-Q. A. S. Mujumdar (2007). "Heat transfer characteristics of nanofluids: a review." International Journal of Thermal Sciences **46**(1): 1-19.
- Wen, D. Y. Ding (2004). Effective thermal conductivity of aqueous suspensions of carbon nanotubes (carbon nanotube nanofluids). Reston, VA, ETATS-UNIS, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Wen, D. Y. Ding (2004). "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions." International Journal of Heat and Mass Transfer **47**(24): 5181-5188.
- Xie et al. (2002). "Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles." Journal of Applied Physics **91**(7): 4568.
- Xie, H., et al. (2003). "Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities." Journal of Applied Physics **94**(8): 4967-4971.
- Xie, H., et al. (2002). "Thermal Conductivity of Suspensions Containing Nanosized SiC Particles." International Journal of Thermophysics **23**: 571-580.
- Xuan, Y. Q. Li (2000). "Heat transfer enhancement of nanofluids." International Journal of Heat and Fluid Flow **21**(1): 58-64.
- Xuan, Y. Q. Li (2003). "Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids." Journal of Heat Transfer **125**(1): 151-155.
- Yang, B. Z. H. Han (2006). "Thermal conductivity enhancement in water-in-FC72 nanoemulsion fluids." Appl Phys Lett **88** (261914).
- Yang, Y., et al. (2005). "Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow." International Journal of Heat and Mass Transfer **48**(6): 1107-1116.
- Zeinali Heris, S., et al. (2006). "Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer." International Communications in Heat and Mass Transfer **33**(4): 529-535.

Zeinali Heris, S., et al. (2007). "Experimental investigation of convective heat transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid in circular tube." International Journal of Heat and Fluid Flow **28**(2): 203-210.

Zhang, X., et al. (2007). "Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles." Experimental Thermal and Fluid Science **31**(6): 593-599.

Zhang, Z. G. et al. (2006). "Thermal and rheological properties of carbon nanotube-in-oil dispersions." Journal of Applied Physics **99**(11): 114307.

Zhu, H., et al. (2006). "Effects of nanoparticle clustering and alignment on thermal conductivities of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> aqueous nanofluids." Applied Physics Letters **89**(2): 023123-023123.

## **Anexos**



## Anexo 1

### Calibração experimental dos vários escoamentos

Tabela 1 - Valores da estabilidade do sistema

Nº Reynolds (Re)	T. entrada ( $T_{in}$ ) [K]	T. Saída ( $T_{out}$ ) [K]	T superfície ( $T_{sup}$ ) [K]	$\Delta T$ ( $T_{in} - T_{out}$ ) [K]	
824	296,7	296,7	296,4	0,0	
	296,5	296,4	296,8	0,2	
	297,5	298,3	297,8	1,1	
	298,1	298,2	298,0	0,4	
	<b>297,2</b>	<b>297,3</b>	<b>297,2</b>	<b>0,4</b>	<b>T médio</b>
1100	298,5	298,9	299,1	0,4	
	298,8	299,2	299,4	0,4	
	299,0	299,3	299,6	0,3	
	<b>298,8</b>	<b>299,1</b>	<b>299,4</b>	<b>0,3</b>	<b>T médio</b>
1470	297,1	297,1	297,6	0,0	
	298,5	298,3	298,9	-0,2	
	298,8	298,9	299,2	0,1	
	296,4	296,1	296,7	-0,3	
	<b>297,7</b>	<b>297,6</b>	<b>298,1</b>	<b>-0,1</b>	<b>T médio</b>
1840	297,7	297,5	298,2	-0,2	
	297,7	297,6	298,3	-0,1	
	296,1	295,9	296,5	-0,2	
	297,1	296,9	297,6	-0,2	
	297,4	297,2	297,8	-0,2	
	<b>297,2</b>	<b>297,0</b>	<b>297,7</b>	<b>-0,2</b>	<b>T médio</b>



## Anexo 2

### Repetibilidade

#### Regime Laminar

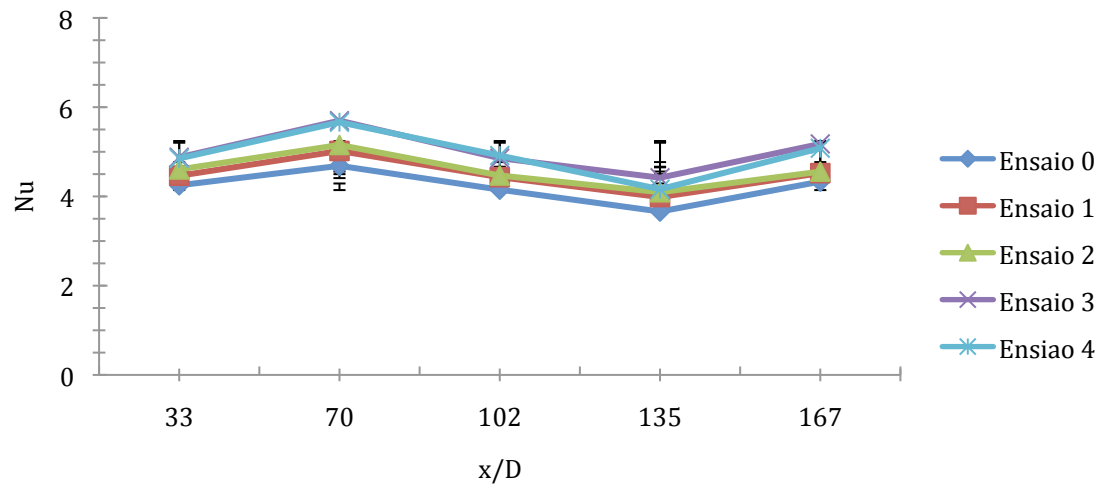


Figura 1 - Valores de *Nusselt* para a água destilada ao longo da posição axial, para  $Re=826$

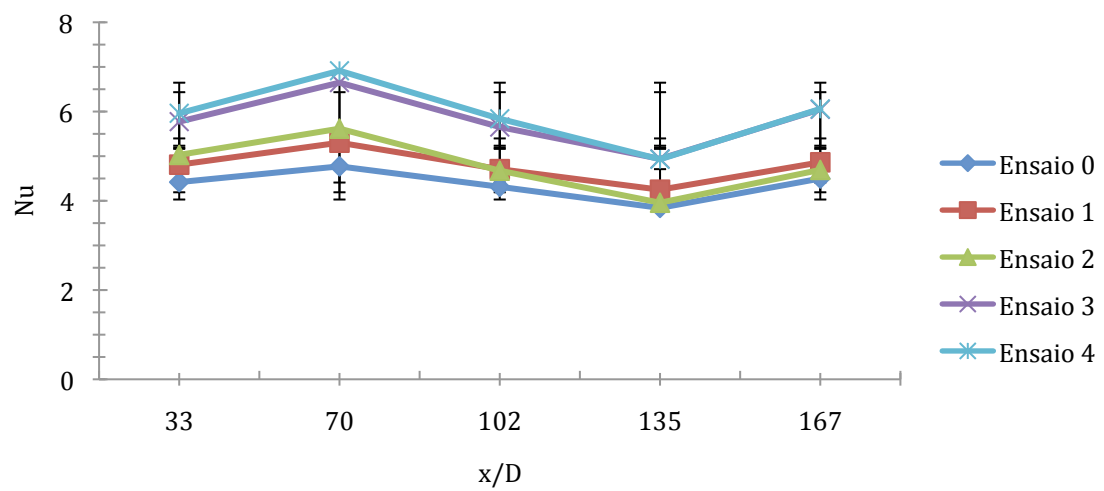


Figura 2 - Valores de *Nusselt* para a água destilada ao longo da posição axial, para  $Re=1237$

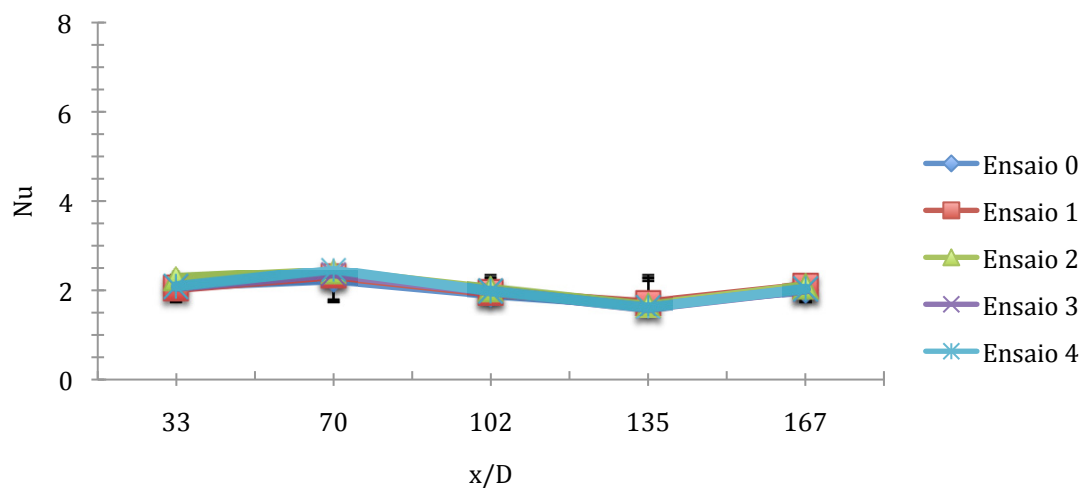


Figura 3 - Valores de *Nusselt* para a água destilada ao longo da posição axial, para  $Re=2060$

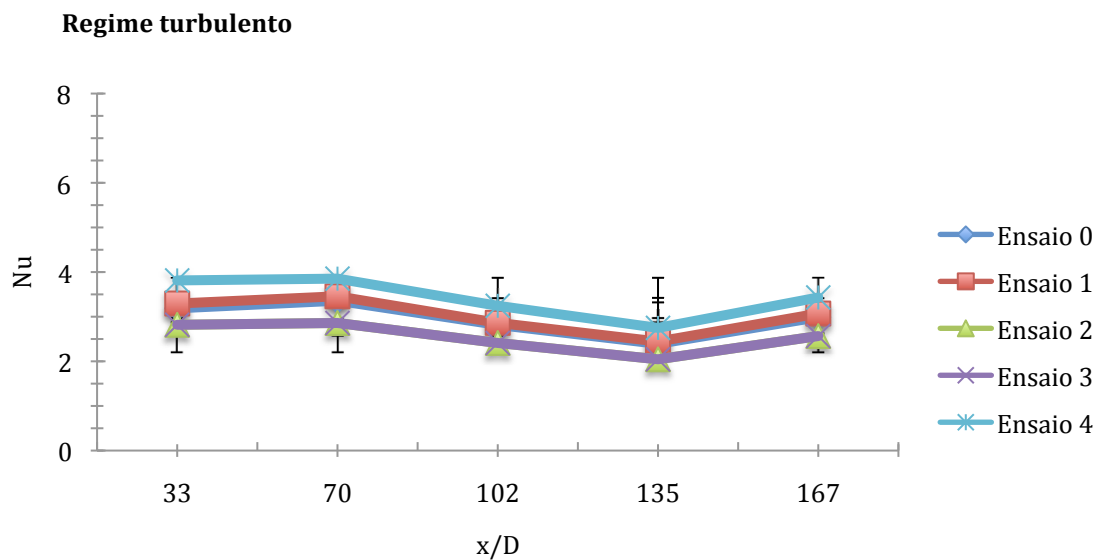


Figura 4 - Valores de *Nusselt* para a água destilada ao longo da posição axial, para  $Re=4122$



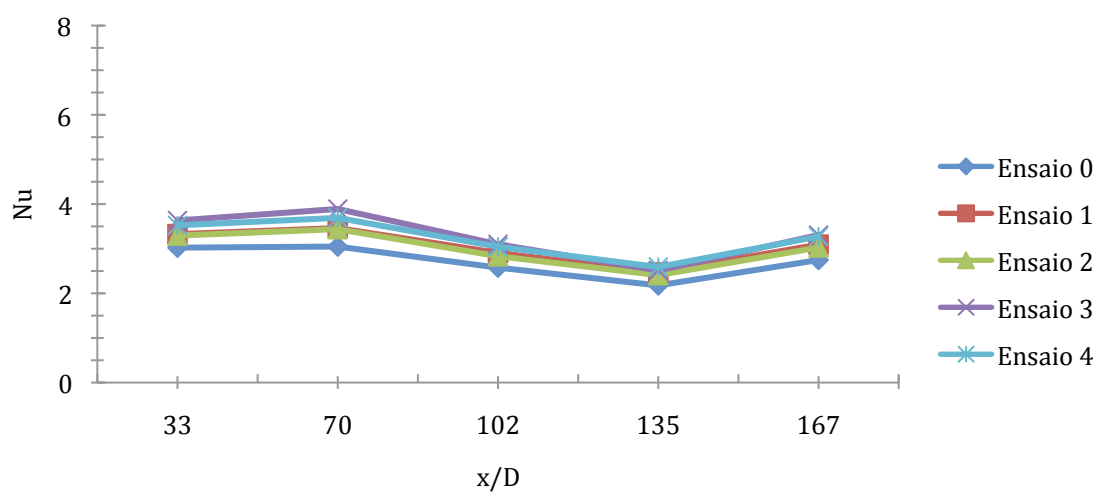


Figura 5 - Valores de *Nusselt* para a água destilada ao longo da posição axial, para  $Re=5153$

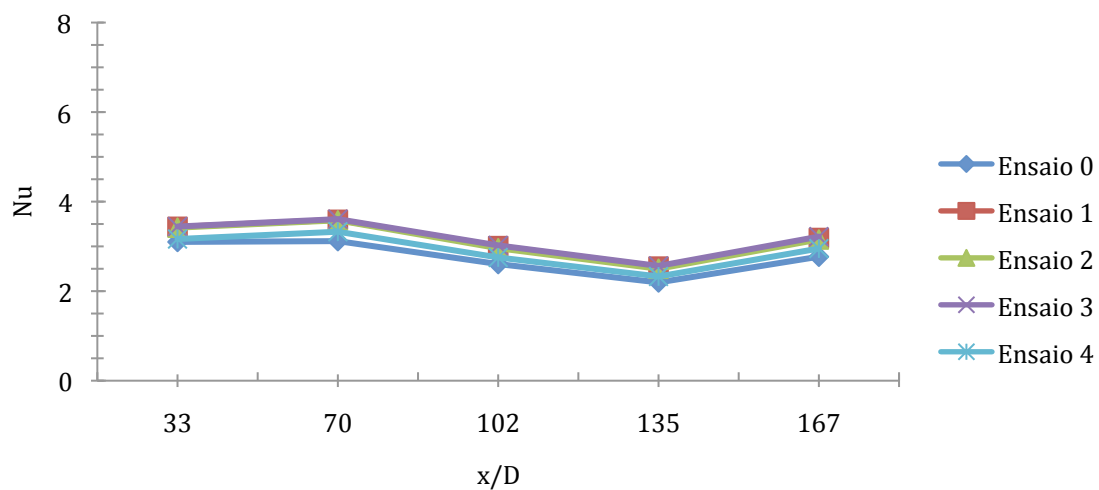


Figura 6 - Valores de *Nusselt* para a água destilada ao longo da posição axial, para  $Re=6183$



## Anexo 3

### Valores médios da convecção e do número de *Nusselt*

#### Água Destilada

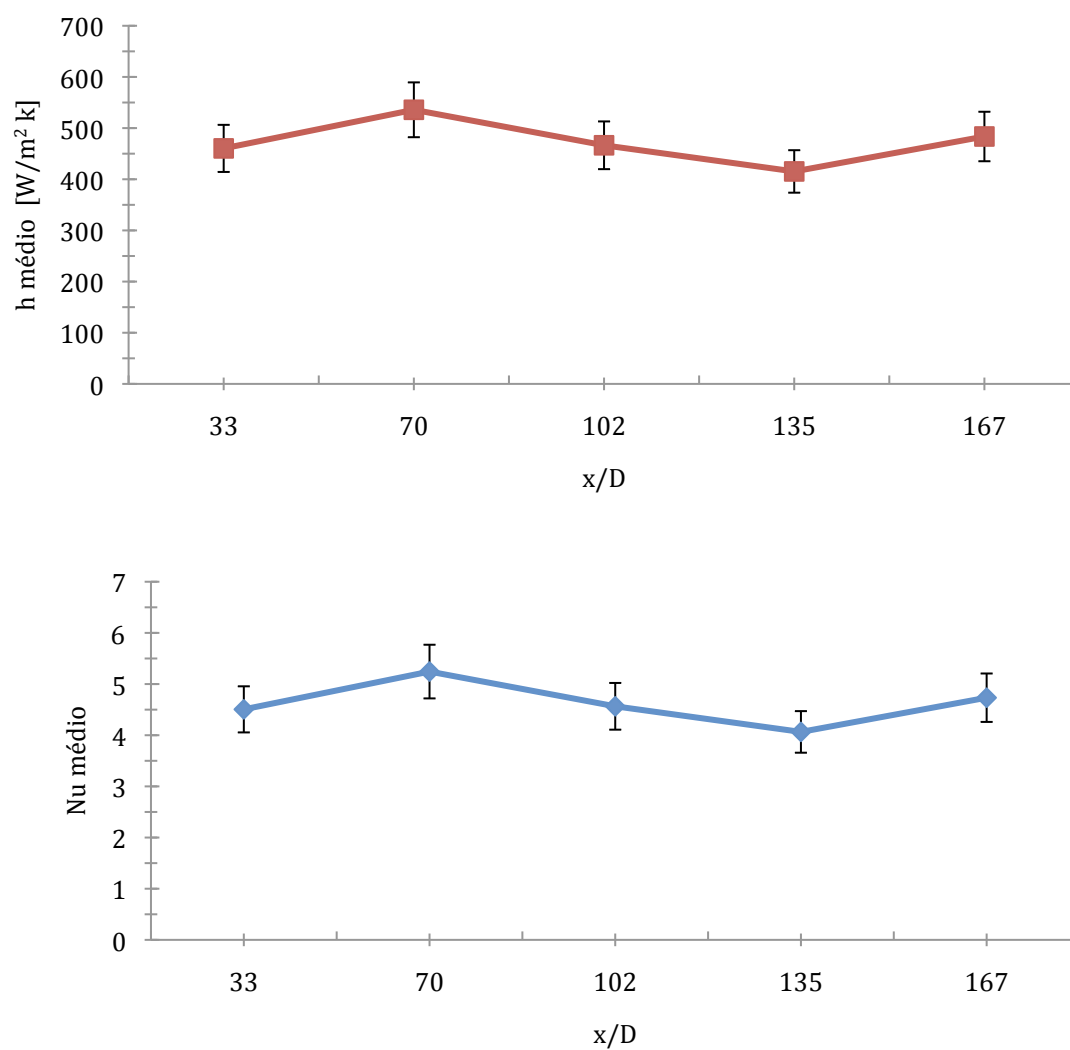


Figura 7 - Coeficiente de convecção e o número de *Nusselt* para a água destilada ao longo da posição axial do tubo e para  $Re=826$

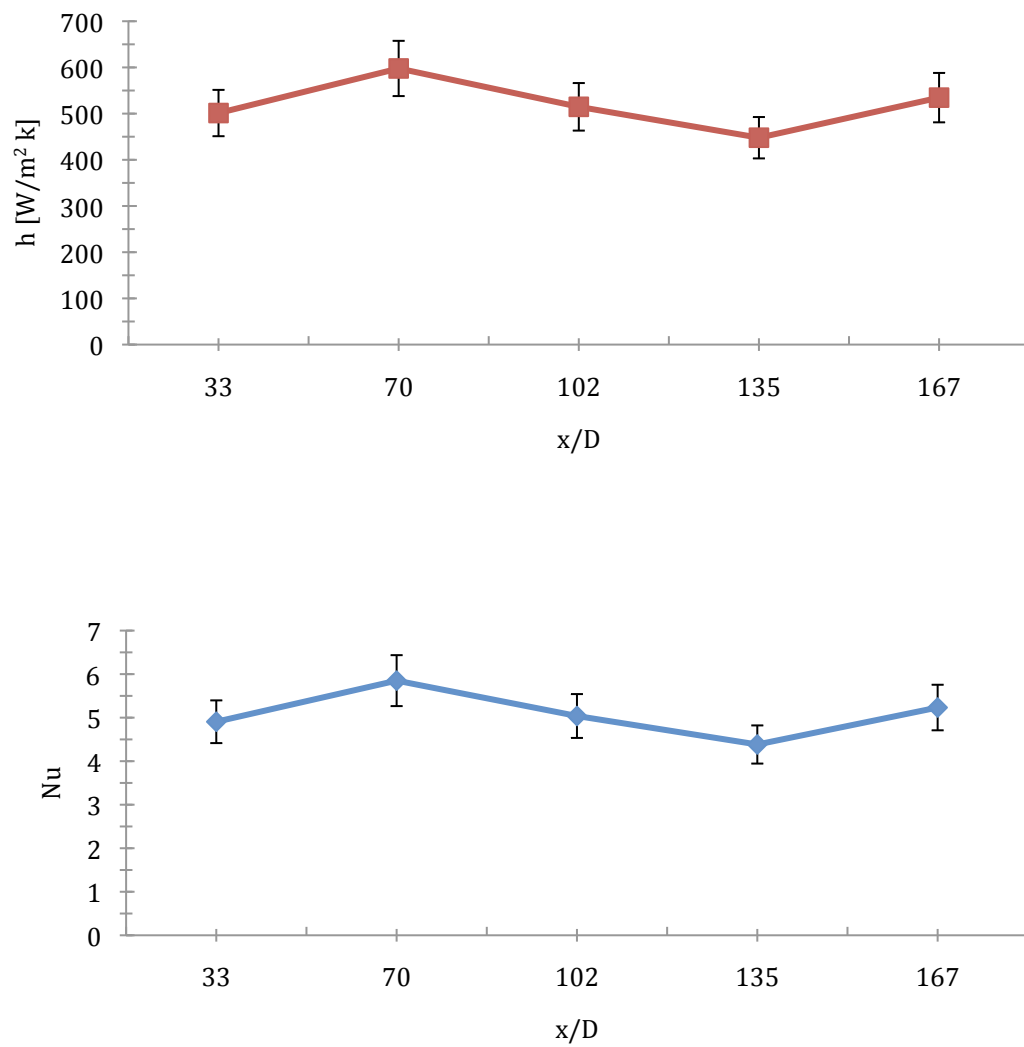


Figura 8 - Coeficiente de convecção e o número de *Nusselt* para a água destilada ao longo da posição axial do tubo e para  $Re=1237$

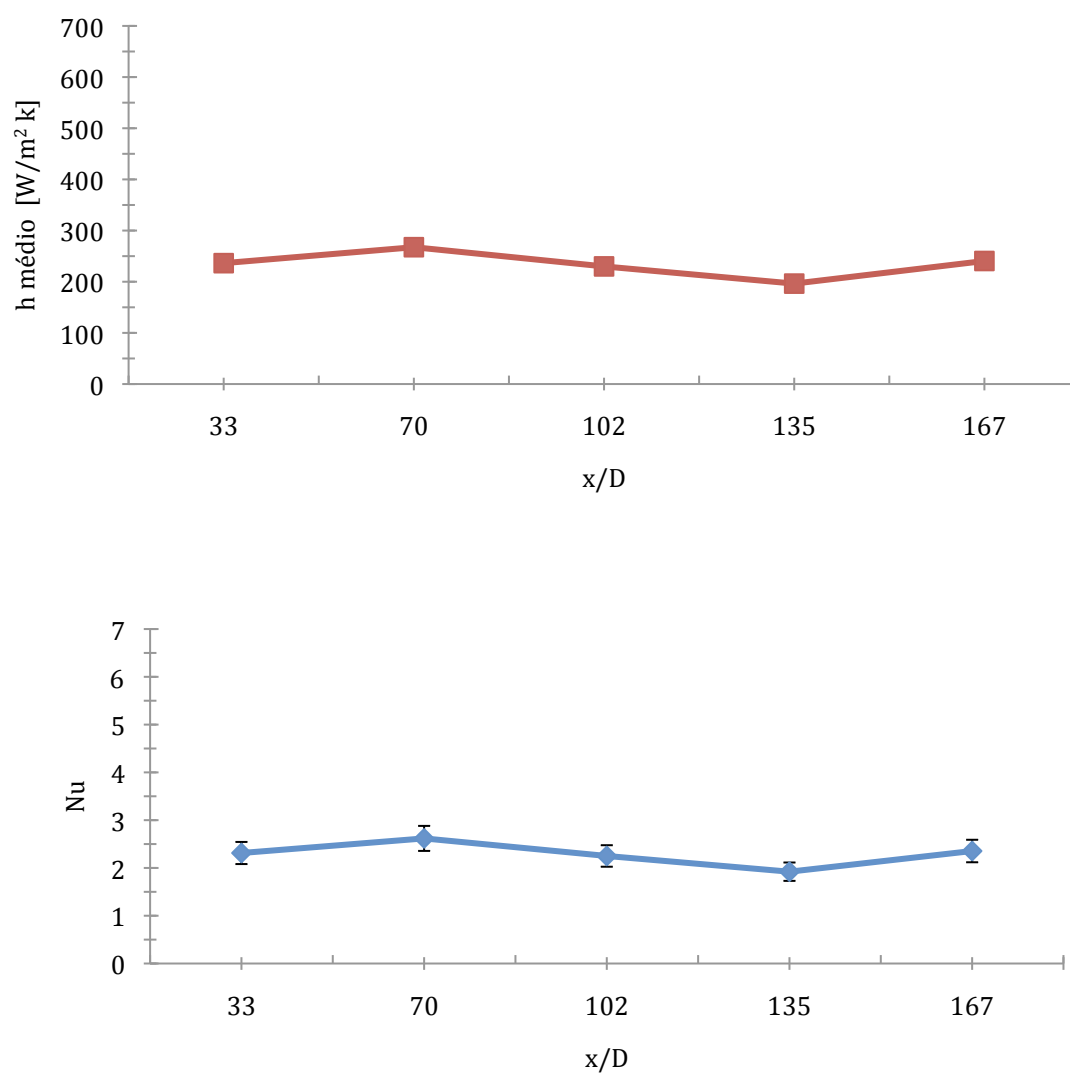


Figura 9 - Coeficiente de convecção e o número de *Nusselt* para a água destilada ao longo da posição axial do tubo e para  $Re=1650$

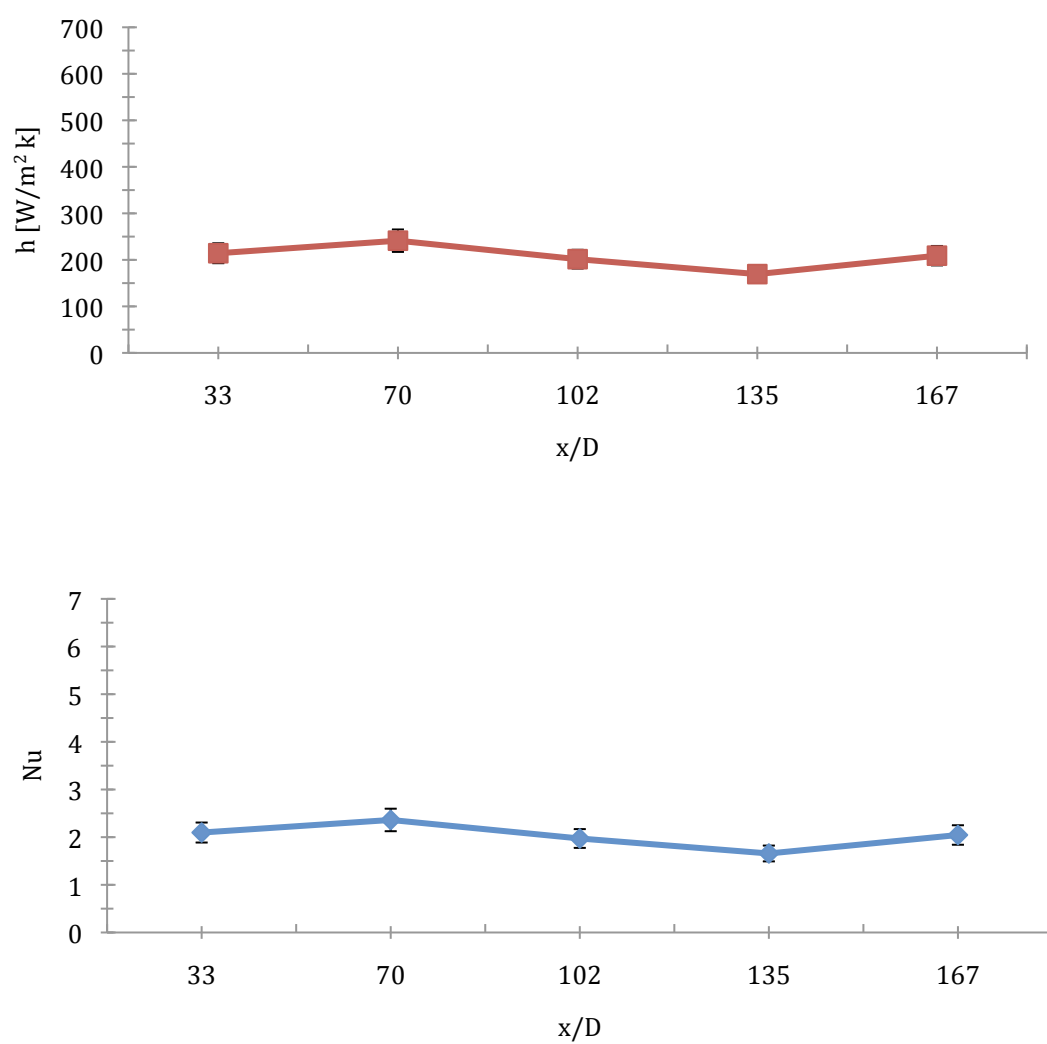


Figura 10 - Coeficiente de convecção e o número de *Nusselt* para a água destilada ao longo da posição axial do tubo e para  $Re=2060$

## Nanofluido 0,25% CNT's

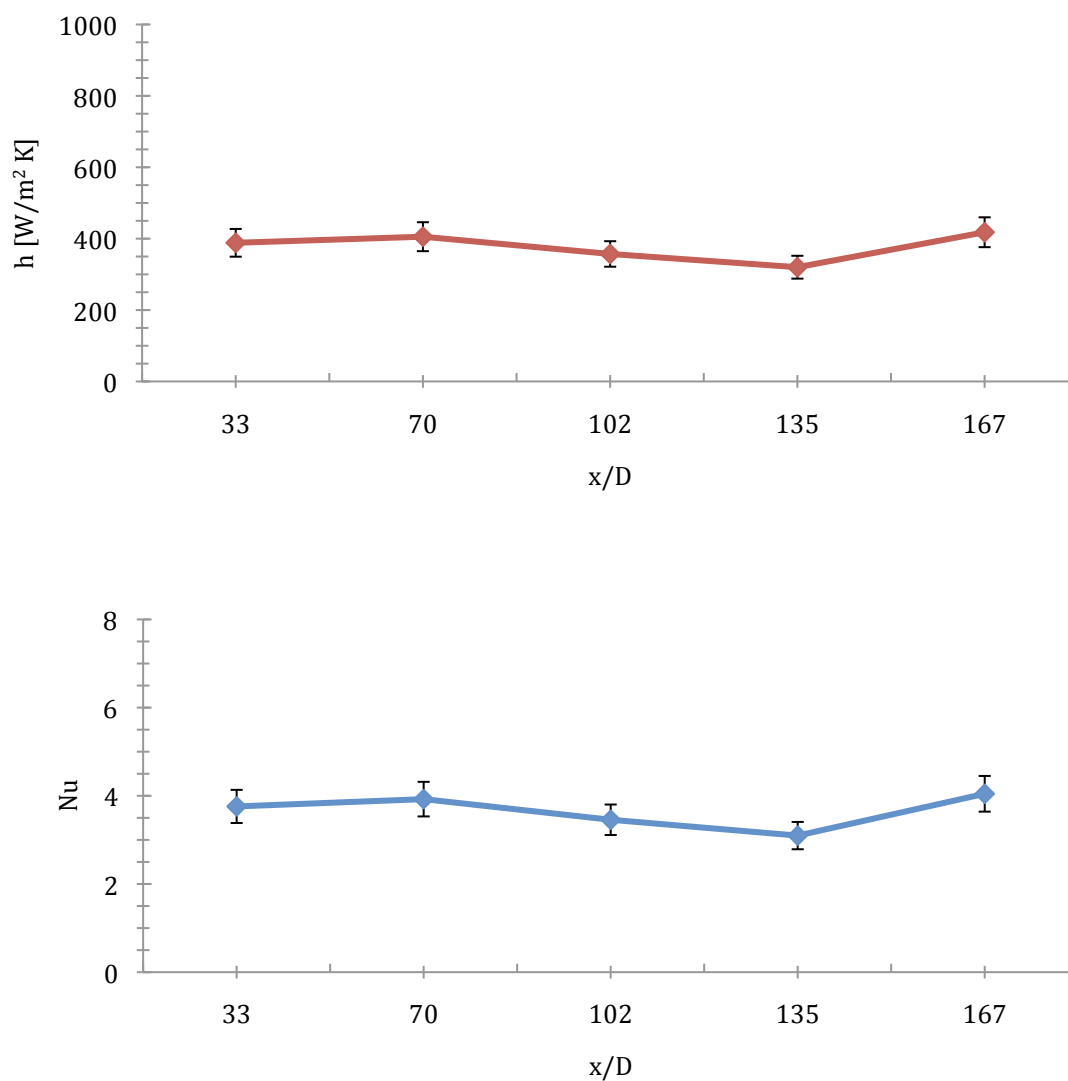


Figura 11 - Coeficiente de convecção e o número de *Nusselt* para o nanofluido 0,25%/CNT's longo da posição axial do tubo e para  $Re=825$

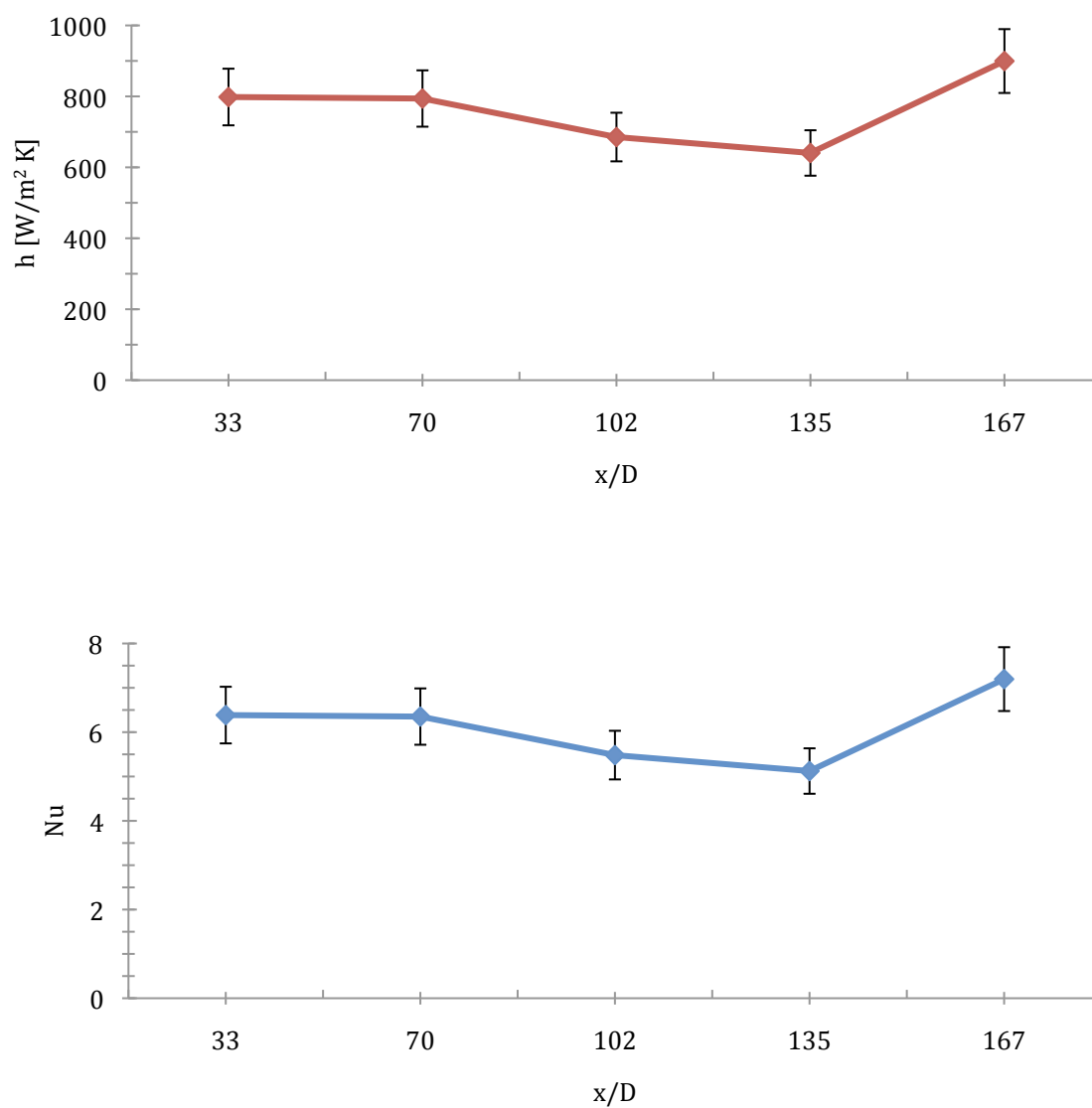


Figura 12 - Coeficiente de convecção e o número de *Nusselt* para o nanofluido 0,25%/CNT's longo da posição axial do tubo e para  $Re=1236$



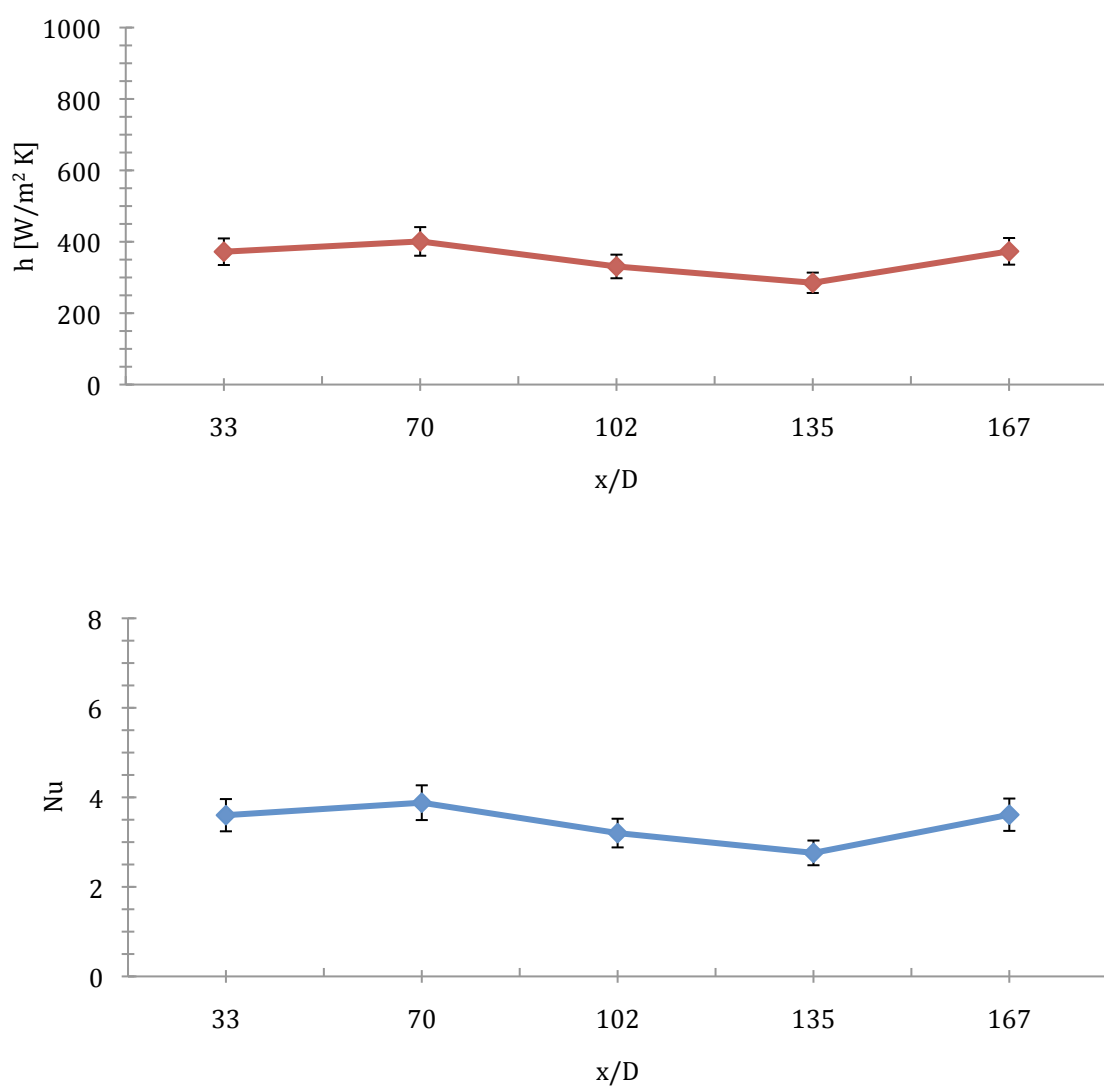


Figura 13 - Coeficiente de convecção e o número de *Nusselt* para o nanofluido 0,25%/CNT's longo da posição axial do tubo e para  $Re=1650$

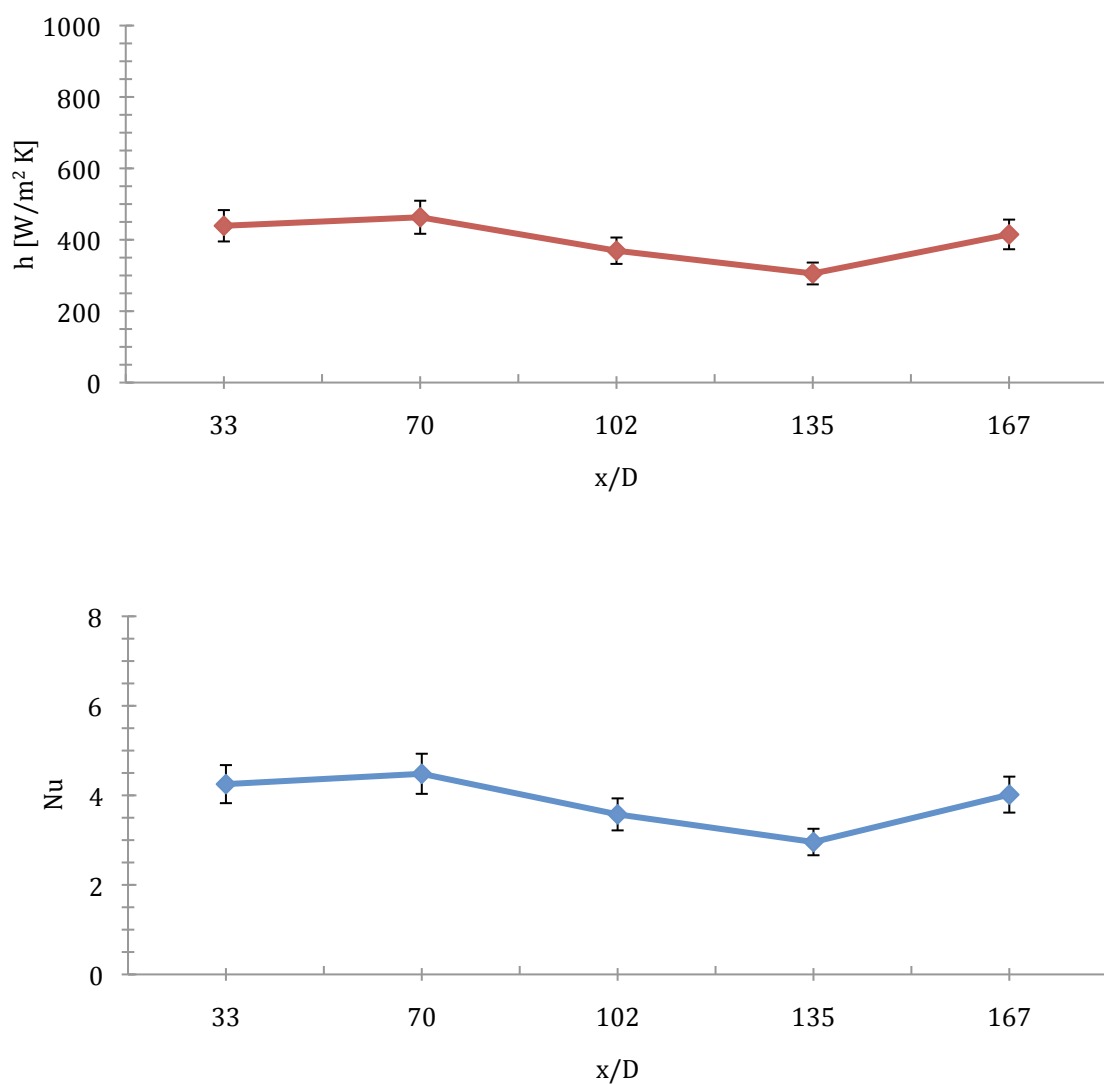


Figura 14 - Coeficiente de convecção e o número de *Nusselt* para o nanofluido 0,25%/CNT's longo da posição axial do tubo e para  $Re=2061$

## Anexo 4

### Comparação dos valores teóricos e experimentais nas posições axiais distintas

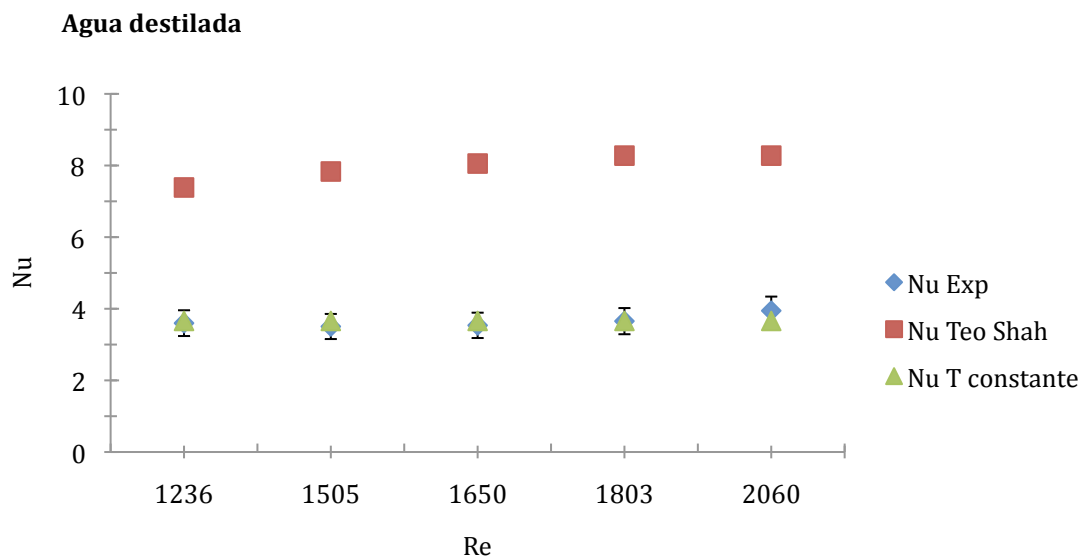


Figura 15 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de *Nusselt* para a água destilada, para a posição axial  $x/D=33$

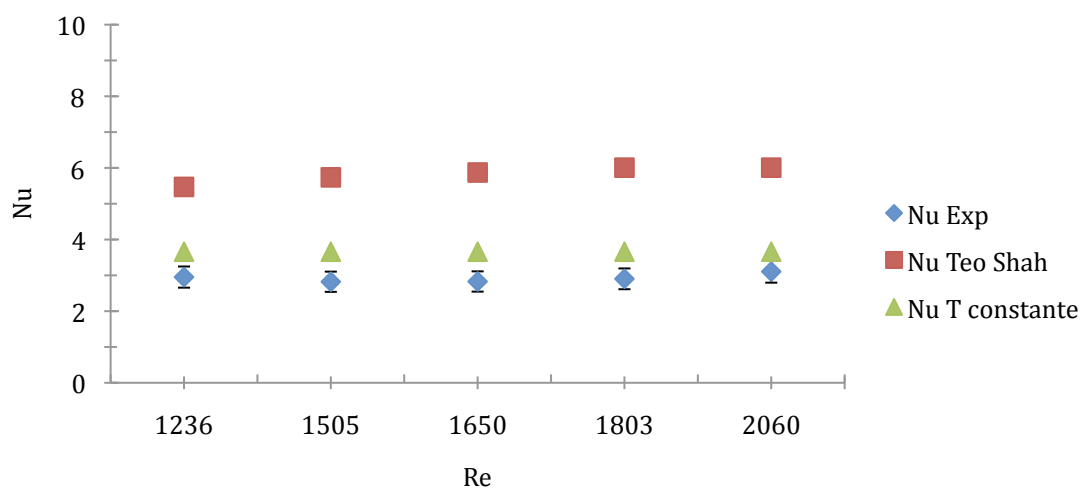


Figura 16 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de *Nusselt* para a água destilada, para a posição axial  $x/D=102$

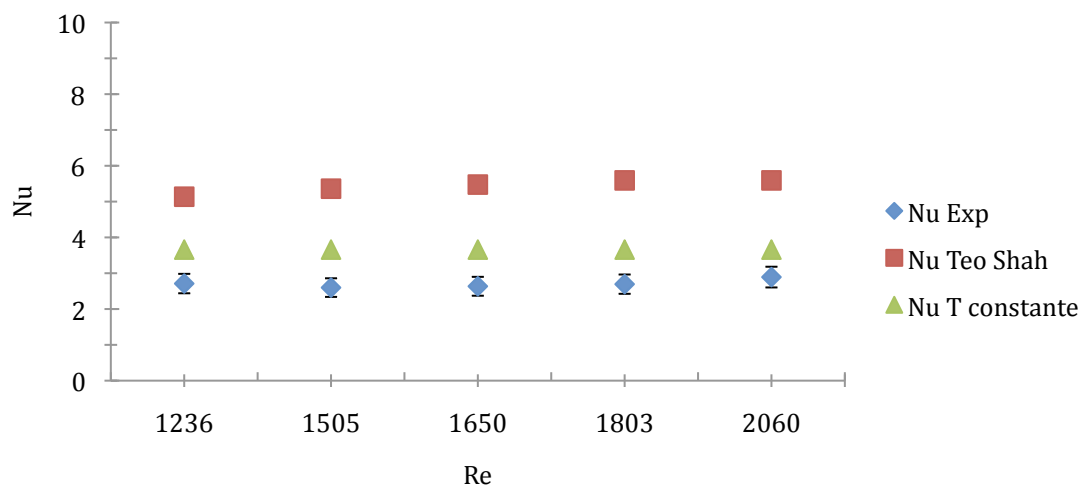


Figura 17 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de *Nusselt* para a água destilada, para a posição axial  $x/D=135$

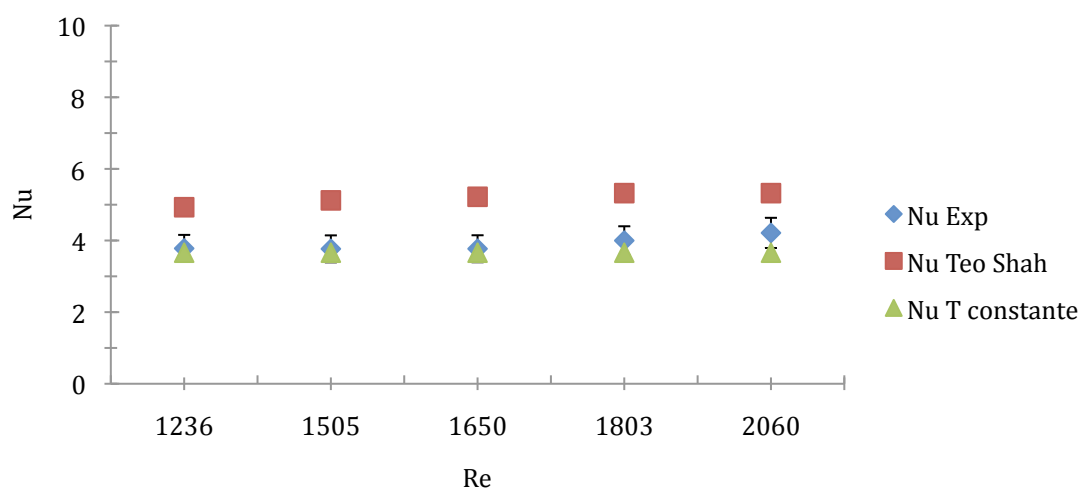


Figura 18 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de *Nusselt* para a água destilada, para a posição axial  $x/D=167$

### Nanofluido Água/0,25% CNT's

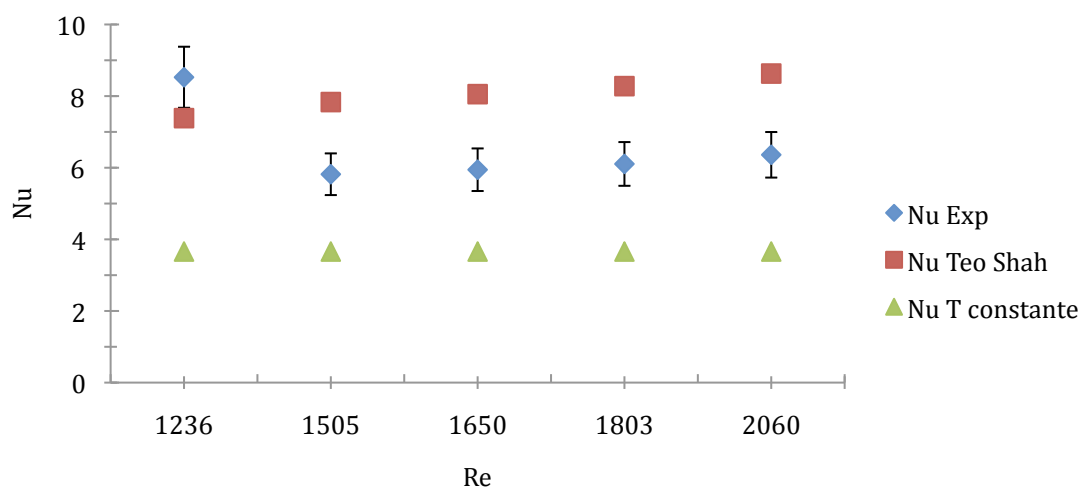


Figura 19 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de *Nusselt* para o nanofluido 0,25% CNT's/água, para a posição axial  $x/D=33$

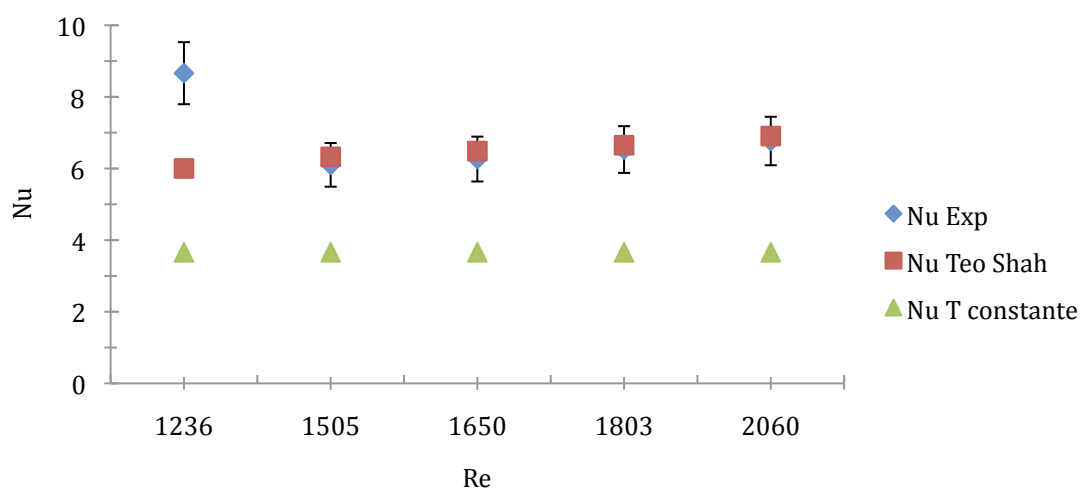


Figura 20 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de *Nusselt* para o nanofluido 0,25% CNT's/água, para a posição axial  $x/D=70$

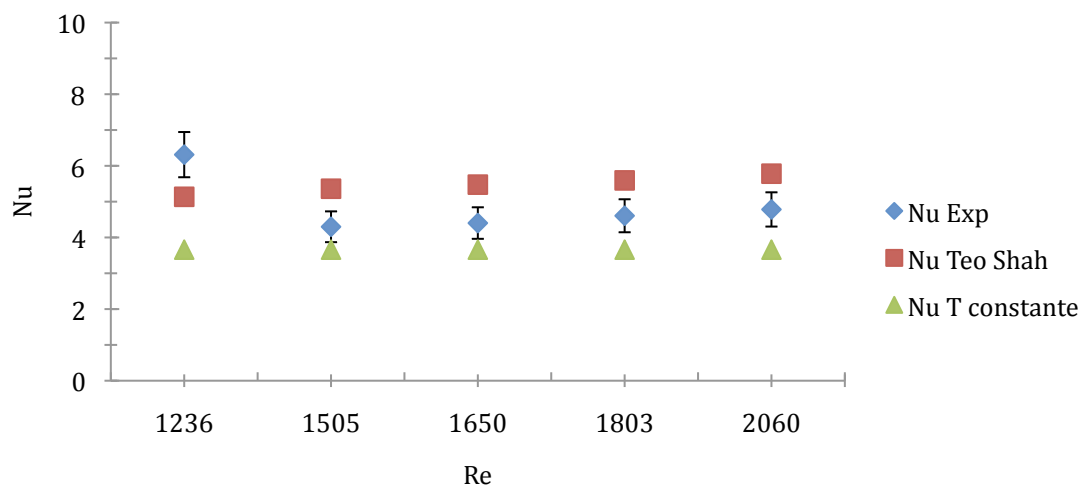


Figura 21 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de *Nusselt* para o nanofluido 0,25% CNT's/água, para a posição axial  $x/D=135$

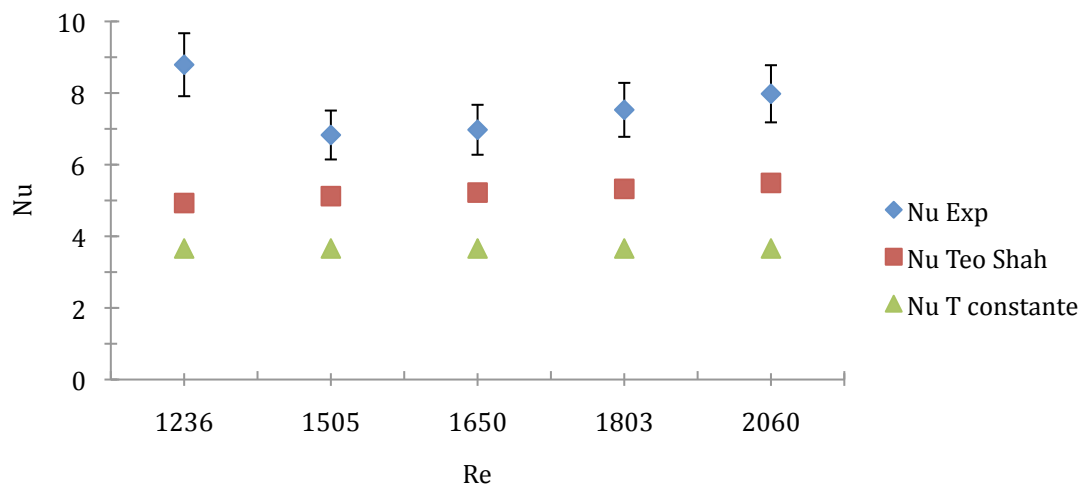


Figura 22 - Comparação entre os valores experimentais e teóricos do número de *Nusselt* para o nanofluido 0,25% CNT's/água, para a posição axial  $x/D=167$

## Anexo 5

Comparação Água Destilada versus 0,25% CNT's/Água

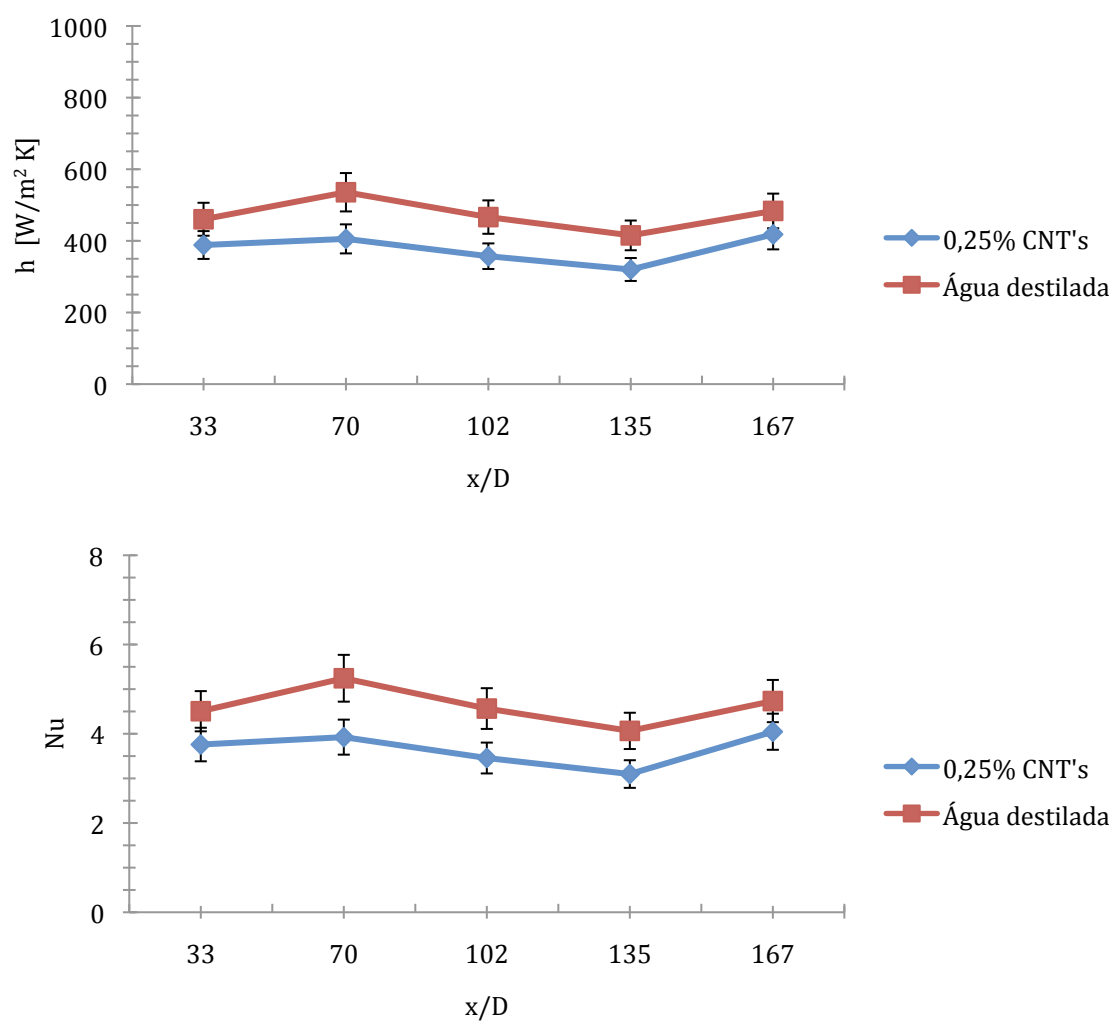


Figura 23 - Comparação entre os valores experimentais do a) coeficiente de transferência de calor e do b) número de *Nusselt* para a água e o nanofluido 0,25% CNT/água ao longo da posição axial para  $Re=825$

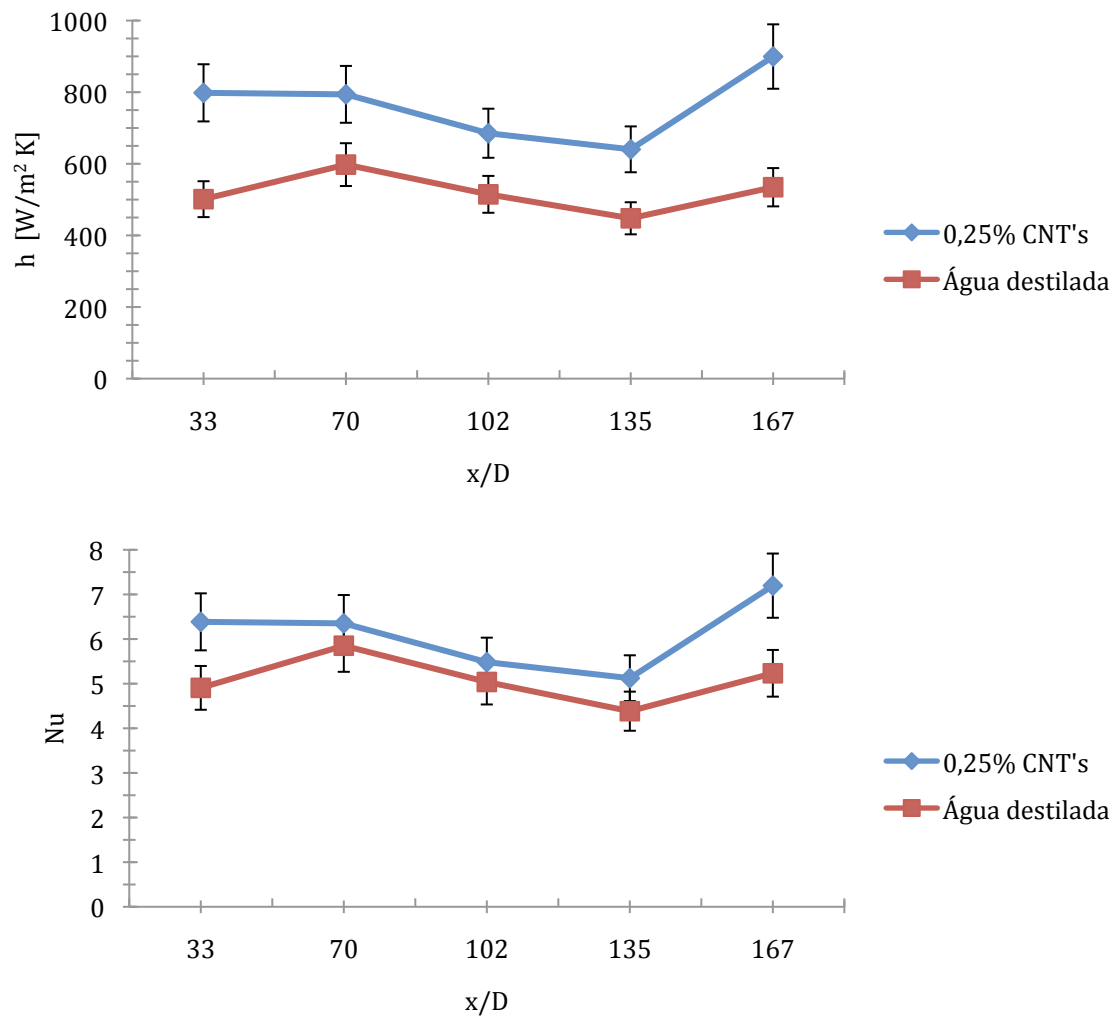


Figura 24 - Comparação entre valores experimentais do a) coeficiente de transferência de calor e do b) número de *Nusselt* para a água e o nanofluido 0,25% CNT/água ao longo da posição axial para  $Re=1236$



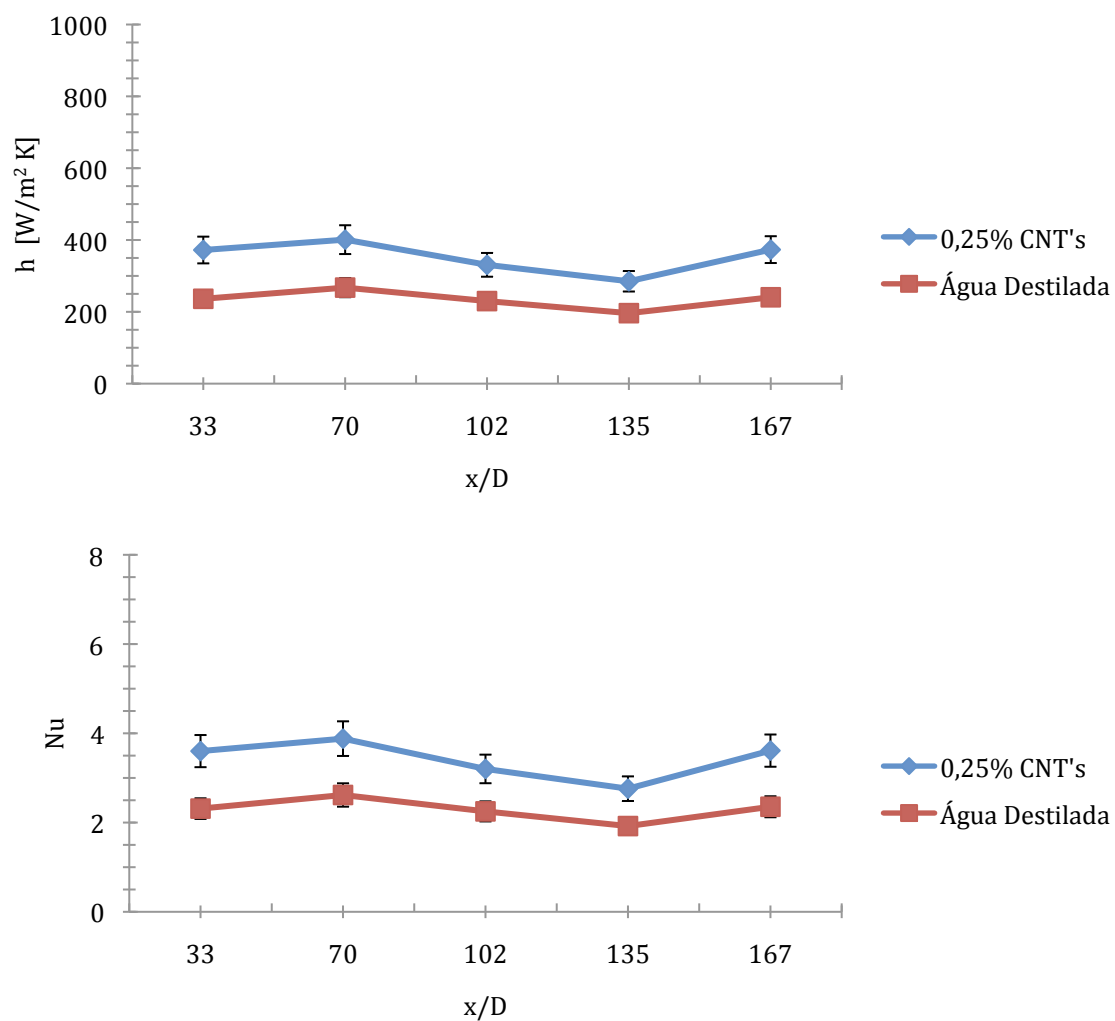


Figura 25 - Comparação entre valores experimentais do a) coeficiente de transferência de calor e do b) número de *Nusselt* para a água e o nanofluido 0,25% CNT/água ao longo da posição axial para  $Re=1650$

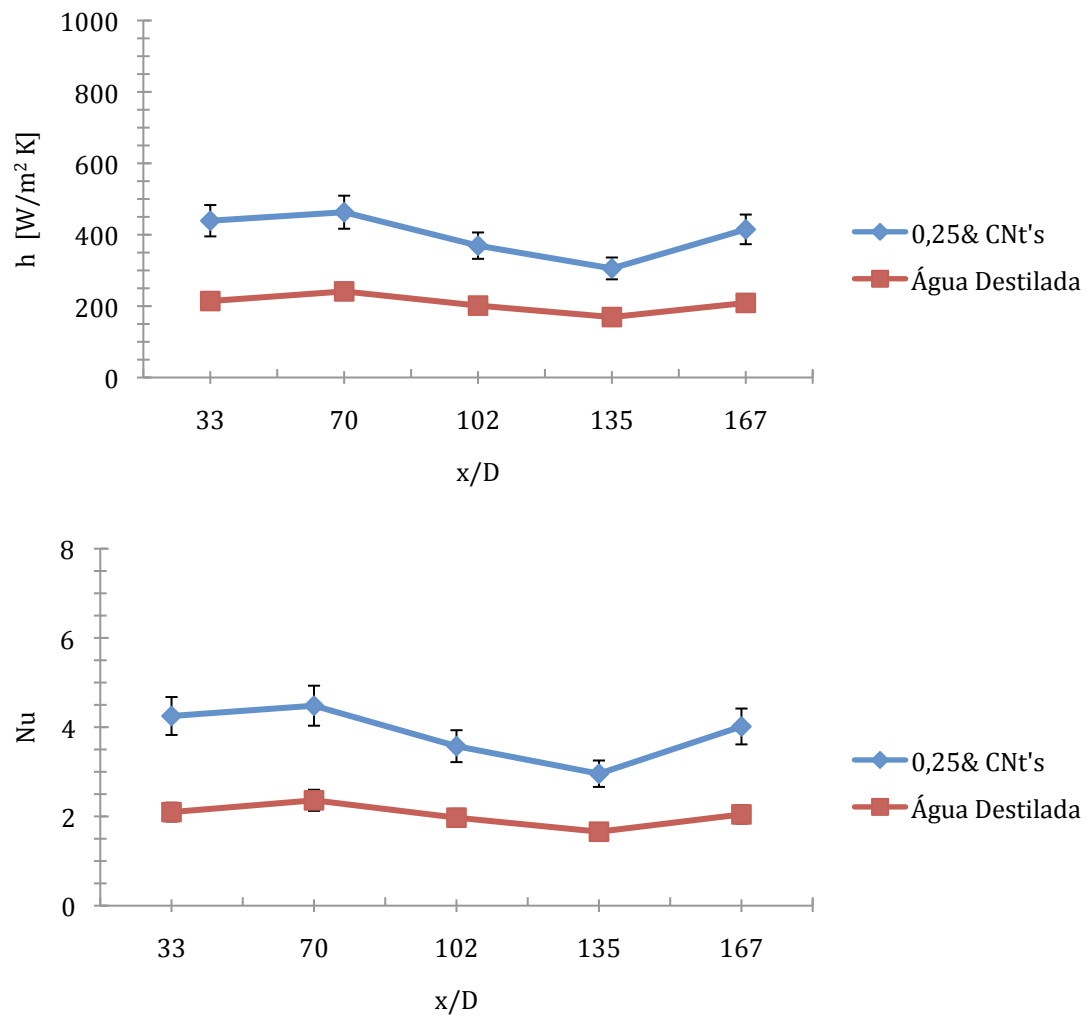


Figura 26 - Comparação entre valores experimentais do a) coeficiente de transferência de calor e do b) número de *Nusselt* para a água e o nanofluido 0,25% CNT'/água ao longo da posição axial para  $Re=2060$